

Д.Х.

НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ
НАУЧНОЙ МЫСЛИ

10-11

С.Н.РЖЕВКИН

СЛУХ И РЕЧЬ
В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДБ

1 0 2 8

ГОСУДАРСТВЕННОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО

С 38962

КОНТРОЛЬНЫЙ ЛИСТОК
СРОКОВ ВОЗВРАТА

КНИГА ДОЛЖНА БЫТЬ
ВОЗВРАЩЕНА НЕ ПОЗЖЕ
УКАЗАННОГО ЗДЕСЬ СРОКА

Колич. пред. выдач

Д.Х.

344

38862

СОУНЬ им. В. Г. Белинского

СОУНЪ им. В. Г. Белинского



СОУНЬ им. В. Г. Белинского

НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ

10—11

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО. МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

534

p-484

79

19 мая 1929

С. Н. РЖЕВКИН

39087

СЛУХ И РЕЧЬ

В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ
ФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

А-ХИИ

Читальный зал
Центральная библиотека

1944 г.

БИБЛИОТЕКА
ИМЕНИ

1-20

100

Д. Г. ВЕДЕНКО
Свердловск

1928 г.
ОЦЕНОЧНЫЙ
Л. 20

КНИГОХРАНИЛИЩЕ
ОБЛ. БИБЛИОТЕКИ
г. СВЕРДЛОВСК

1

9

2

8

Ив. 1936 г. № 38962

612.85

7

О Т П Е Ч А Т А Н О
в 1-й Образцовой типографии
Гиза. Москва, Ятницкая, 71.
Главлит А-13258. Н. 10. Гиз 26092.
Заказ 1177. Тираж 3 000 экз.

СОУНЬ ИМ. В. В. Белинского

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учение о звуке, привлекавшее к себе в XIX веке внимание широкого круга физиков и приведенное в законченную систему трудами Гельмгольца, Рэля и ряда других крупных ученых, в последние десятилетия XIX столетия и в начале XX века оказалось почти вне круга широких научных исследований, будучи заслонено более животрепещущими вопросами.

Причину уменьшения интереса к акустике следует искать, вероятно, во-первых, в том, что в этой области основные принципы уже были твердо установлены, и казалось, что на долю исследователей в области акустики остается лишь разработка отдельных деталей, а во-вторых, еще и в том, что дальнейшие акустические исследования наталкивались на чрезвычайно большие экспериментальные трудности, и решение многих важных и спорных вопросов ожидало дальнейшего усовершенствования экспериментальной техники. В ослаблении интереса к акустике немаловажную роль играло еще и то обстоятельство, что до последнего времени она имела очень мало практических приложений.

В настоящее время положение резко изменилось. За последние десятилетия акустика получила чрезвычайно широкое поле приложений как в технике, так и

в практической жизни. Особенно разнообразны и интересны применения акустических методов в военном деле. Чтобы несколько характеризовать широту современных применений акустики, я приведу некоторые примеры.

Телефония и радио-телефония в своем интенсивном развитии встали перед необходимостью объективного изучения и анализа феномена речи и звукового материала вообще, а также и слухового аппарата человека, без чего дальнейший прогресс в этой области был затруднителен. Крупнейшие мировые фирмы, работающие в области связи — Вестерн Электрик К^о в Америке и Сименс-Концерн в Германии, организовали большие прекрасно оборудованные акустические лаборатории, в которых заняты научной работой десятки ученых — физиков, физиологов и инженеров. Этот факт с несомненностью показывает, насколько жизненно необходимыми стали научные исследования в этой области.

В результате долголетней работы по изучению звуков, этими лабораториями и рядом других исследователей в настоящее время накоплен и исследован огромный материал, объективно характеризующий весь наличный мир звуков: звуки речи, музыку, шумы и другие звуки.

В работах последних лет также весьма подробно и тщательно исследовался орган слуха. В этой области накоплен чрезвычайно богатый научный материал по изучению строения уха, и вместе с тем разрешен ряд важнейших практических вопросов. Укажу хотя бы на разработку методики испытаний остроты слуха в целях отбора работников различных профессий, для целей медицинской диагностики и точного учета степени инвалидности, на рациональную постановку изготовления

аппаратов для глухих (Вестерн Электрик К⁰), на выяснение некоторых возможностей лечения глухоты акустическими методами. Правильная постановка задачи о передаче звуков с усиленной громкостью и телефонная передача на десятки тысяч километров оказались возможными также лишь на основании точного знания функций уха в связи с детальным изучением речи.

Задача конструирования мощных неискажающих репродукторов (громкоговорителей) по своей сложности оказалась для техники подлинным камнем преткновения. Пока мы не имели точного учета всех особенностей слуха и речи, удовлетворительное разрешение этой задачи было, вообще говоря, немыслимо. В настоящее время, после десятка лет работы, эта задача близка к окончательному и безукоризненному разрешению.

В области устройства аппаратов для записи и репродукции звуков (граммофонов и фонографов) в последние годы сделаны большие успехи, которые также обусловлены правильной постановкой связанных с этим вопросом акустических проблем.

В военном и морском деле, особенно в области подводной морской связи, акустические методы дали блестящие результаты. Акустическую подводную связь удается в настоящее время осуществить на расстоянии сотен километров. В виду практической важности этих задач подводная акустика является в настоящее время уже сложившейся отраслью техники. (См. напр. книгу Aigner'a: Unterwasserschalltechnik.)

Теоретическая и опытная разработка проблем подводной акустики дала мощный толчок к развитию научной мысли, и, помимо разрешения основных практических задач в этой области, наука обогатилась новыми откры-

тиями и изобретениями. Я имею в виду, во-первых, работы Константинеско по передаче больших мощностей помощью звука по трубам с водой и постройку генераторов и моторов, аналогичных электрическим; во-вторых, работы по изучению ультра-звуков с частотами выше предела слышимости, которые при помощи пьезо-кристаллов (Ланжевен¹) могут быть излучаемы направленным пучком (аналогично лучам света, излучаемым прожектором), и которые, как оказалось, производят ряд до сих пор совершенно неизвестных и неожиданных биологических действий. (Вуд и Лумис²).

Техника подслушивания звуков под землей, развившаяся в связи с потребностями минного дела на войне, в настоящее время с успехом применяется в горном деле для разведок месторождения полезных ископаемых посредством наблюдения эхо, отраженного от пластов руды.

Изучение способности человека определять на слух положение источника звука (бинауральный эффект) позволило подойти к конструированию ряда аппаратов для военного дела, а также для морской и воздушной навигации, предназначенных для обнаружения и нанесения на карту невидимых источников звука --- например кораблей, аэропланов, стреляющих орудий и т. п.

Нельзя не упомянуть также о применении акустики в строительном деле (архитектурная акустика), что в настоящее время дало возможность разрешить задачу о рациональной конструкции театров и лекционных зал,

¹ P. Langevin. La Nature, May, 1925.

² R. Wood and A. Loomis. Phil. Mag. 4, p. 417, 1927.

а также подойти к разрешению вопроса о звуковой изоляции в различных случаях строительства.

Изучение музыкальных звуков и музыкальных инструментов с акустической точки зрения, хотя и насчитывает большую давность по времени, но еще далеко не может считаться задачей, доведенной до конца. Музыкальная акустика пока находится в зачаточном состоянии и, вероятно, быстро разовьется, используя усовершенствованную методику и богатый накопленный материал.

Из этого краткого обзора приложений современной „Технической акустики“, как мне кажется очевидно, что объективное изучение речи и, в особенности, слуха должно являться фундаментом почти для всех основных звукотехнических расчетов. Это и понятно: ведь слух и речь являются начальным и конечным звеном в линии нашей акустической связи, поэтому знание функционирования органов речи и слуха лежит в основе всей звуко-техники.

Настоящая книжка посвящена обзору новейших исследований слуха и речи. Все изложение вопроса пришлось дать в возможно сжатой форме, не загружая книги общим материалом, а также деталями, ввиду чего я заранее ожидаю обвинений в неполноте изложения. Но я писал, во-первых, прежде всего о том, что с моей точки зрения является в данной области наиболее существенным и современным; во-вторых, в изложении того или другого вопроса зачастую опускал как мелкие подробности его, так и исторические данные.

Мне думается, что все изложенное в этой книжке будет иметь некоторый интерес для довольно широкого круга специалистов: для физиков, физиологов и врачей, музыкантов, радио-инженеров и инженеров слаботочни-

ков, но, вероятно, не удовлетворит до конца ни тех, ни других, ни третьих, так как изложение ведется лишь в плане обзора вопроса и не входит в детали. В виду этого я постарался по возможности привести в сносках библиографию рассматриваемых вопросов.

С. Ржевкин.

Москва,
Январь, 1928 г.

Глава I

СТРОЕНИЕ СЛУХОВОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА. ПРЕДЕЛЫ СЛЫШИМОСТИ ЗВУКА

В слуховом органе человека различают три части: наружное, среднее и внутреннее ухо. Рис. 1 схематически показывает строение органа слуха. Звуковые колебания передаются из слухового прохода (15, 16) на барабанную перепонку (17) и от нее через слуховые косточки: молот (18), наковальню (19) и стремя (20) во внутреннюю полость лабиринта (9). Внешняя форма костного лабиринта (левого) изображена на рис. 2 так, как мы ее видели бы снаружи.

В лабиринте лежат чувствительные к звуку нервные окончания, и он заключает в себе, кроме того, орган равновесия (полукружные каналы). Нервные волокна, чувствительные к звуку, лежат в части лабиринта, называемой улиткой. Улитка представляет собой спирально-закрученную костную оболочку ($2\frac{3}{4}$ оборота), внутри которой идет непрерывающийся от основания до вершины проход. Проход этот (если его выпрямить) имеет в длину около 31—33 мм; диаметр его у основания—9 мм, а у вершины—1,8 мм. Он разделен по всей длине на две части (см. рис. 3), границей между которыми служит в

большей части поперечника костная перегородка, спирально завитая вдоль ходов улитки (*lamina spiralis*) и на меньшем протяжении — гибкая перепонка — основная мембрана (*membrana basilaris*).

Параллельно основной мембране и на очень близком расстоянии от нее идет вторая мембрана — текториальная, или кортиева, мембрана: она начинается, так

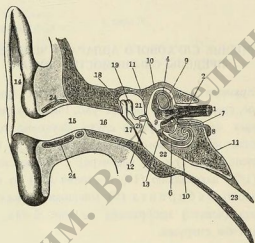


Рис. 1. Схематический разрез органа слуха: 1—слуховой нерв, 2—внутренний слуховой проход, 3—utricle, 4—один из трех полукружных каналов, 5—sacculus, 6—улиточный ход (ductus cochlearis), 7—ductus endolymphaticus, 8—sacculus endolymphaticus, 9—перилимфатическая область, 10—костный лабиринт, 11—височная кость (скальная часть), 12—овальное окно, 13—круглое окно, 14—ушная раковина, 15-16—наружный слуховой проход, 17—барабанная перепонка, 18—молот, 19—наковальня, 20—стремя, 21-22—среднее ухо, 23—евстахиева труба.

же, как и основная, от края костной перегородки, но распространяется лишь на незначительную часть ширины улиточного хода, не доходя до его противоположного края. Часть основной мембраны, лежащая рядом с тек-

ториальной, значительно утолщена, и как раз в этом месте ее разветвляются окончания слуховых нервов. Окончания клеток основной мембраны в соседстве с текториальной мембраной имеют тончайшие волоски, которые могут соприкасаться с текториальной мембраной при колебаниях, почему эти клетки и называют часто волосатыми клетками.

В области утолщения основной мембраны (рис. 3), прилегающей к костной спиральной перегородке, лежат

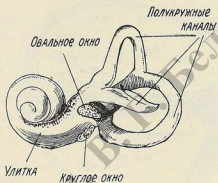


Рис. 2. Вид левого лабиринта снаружи.

особые образования — упругие кортиевы дуги (*organon spirale*), которым Гельмгольц в первом варианте своей теории слуха (от которого он позже отказался) приписывал роль настроенных на различные звуковые частоты элементов, но которые, повидимому, имеют лишь значение упругих органов, вызывающих напряжение основной мембраны. Дуги Корти отсутствуют, между прочим, у птиц, которые прекрасно воспринимают высоту тона.

Основная мембрана, вестибулярная (или Рейснерова) мембрана, видная на рис. 3, и оболочка, лежащая

по стенке лабиринта, образуют вместе спиральный ход трехгранного сечения (*ductus cochlearis*), называемый перепончатым лабиринтом. Жидкость, его наполняющая, называется эндолимфа, жидкость же в двух других частях хода улитки — вестибулярной и барабанной лестницах (*scala vestibuli*, *scala tympani*) — называется перилимфой. Эти жидкости довольно близки между собою по составу.

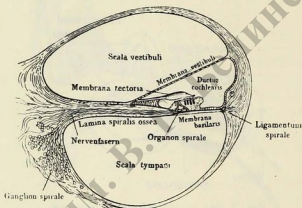


Рис. 3. Поперечный разрез хода улитки.

Основная мембрана состоит из большого числа поперечных волокон (по исследованиям различных ученых от 13 000 до 24 000 волокон), весьма упругих и слабо связанных друг с другом. Число окончаний слухового нерва доходит до 4 000. Две части хода улитки, разделенные основной мембраной, соединяются у вершины улитки маленьким отверстием (геликотрема). Обе части улиточного хода сообщаются с воздушной полостью среднего уха через затяннутые упругими перепонками

отверстия: овальное окно (рис. 1, 12), к перепонке которого прикреплена слуховая косточка (стремя), передающая жидкости улитки через цепь других косточек (молот и наковальня) движения барабанной перепонки, и круглое окно (рис. 1, 13), ни с чем не соединенное и выходящее в воздушную полость среднего уха. Овальное окно находится в утолщении лабиринта, называемом преддверием (vestibulum), из которого и начинается вестибулярная часть улиточного хода (scala vestibuli).

Ниже приводятся данные о размерах различных частей слухового аппарата:

1. Площадь наружного отверстия слухового канала	0,33 — 0,5	см ²
2. Глубина наружного слухового канала	2,1 — 2,6	см
3. Объем слухового канала	около 1	см ³
4. Горизонтальный диаметр барабанной перепонки	» 1	см
5. Вертикальный диаметр барабанной перепонки	» 0,85	см
6. Площадь барабанной перепонки	» 0,65	см ²
7. Вес молоточка	» 23	мг
8. » наковальни	» 25	»
9. » стремени	» 3	»
10. Объем костного лабиринта	» 0,2	см ³
11. Диаметр улитки у основания	0,9	см
12. » » » вершины	0,18	см

Строение уха схематически изображено на рис. 4 а: канал улитки здесь изображен выпрямленным и относительно более широким, чем в действительности; он представлен в разрезе, перпендикулярном, вдоль всей его длины, к слуховой мембране и спиральной перегородке.

Звуковые волны, проникая в слуховой канал, приводят в колебания барабанную перепонку (Б) и через цепь

сочлененных косточек (молот, наковальня, стремя) передают колебательные движения овальному окну (Ов) и через него жидкости улитки. Движения овального окна неизбежно вызывают через посредство жидкости (почти несжимаемой) движения круглого окна (Кр), обратные по направлению (аналогично тому, как это про-

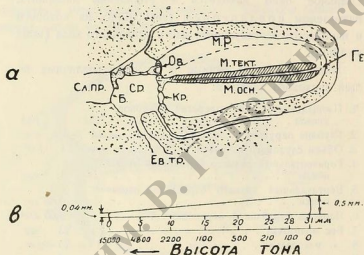


Рис. 4. *a* — схематический чертеж улитки; *b* — распределение тонов по длине основной мембраны.

исходит в гидравлическом прессе). Жидкость улитки, передающая колебания, в своем движении приводит в колебание определенные части основной мембраны (М. осн.), чем вызывается прикосновение волосатых клеток к текториальной мембране (М. тект.), влекущее за собой раздражение слуховых нервов.

Строение основной мембраны таково, что весьма вероятно предположить в отдельных частях ее способность

к почти независимым колебаниям с определенной собственной частотой. Если овальное окно подвергается медленному вдавливанию, то жидкость движется кругом, через весь улиточный ход. Через гелиотрему (Ге) движение передается в другую половину хода и производит выпячивание круглого окна; таким образом при медленном вдавливании овального окна основная мембрана не участвует в движении. Так дело происходит при медленных колебаниях с частотой менее 20 периодов в сек.; совершенно иной процесс происходит при быстрых колебаниях.

Для объяснения восприятия улиткой различных по высоте тонов Гельмгольц предложил резонансную теорию слуха, основанную на том предположении, что отдельные волокна основной мембраны являются как бы струнами, настроенными на различные тоны в пределах от нижнего до верхнего предела слуха. Он предположил, что волокна, лежащие у основания улитки, должны воспринимать высокие тона, волокна же, находящиеся у вершины ее, — низкие. Эта теория прекрасно объясняет большинство фактов из области слуха, но все же наталкивается на ряд трудностей, о которых речь будет идти позднее.

Анатомические данные говорят за возможность наличия резонансных свойств у основной мембраны. Волокна мембраны легко отделяются друг от друга в поперечном направлении, и, наоборот, они значительно прочнее в направлении радиуса канала улитки. Таким образом отдельные волокна легко могут колебаться изолированно. Основная мембрана у корня улитки имеет ширину 0,04 мм, у вершины — 0,5 мм, таким образом вероятно, что волокна более длинные, то есть соответствующие более

низким тонам, лежат ближе к вершине улитки. Самый факт, что волокна такой незначительной длины, довольно массивные и находящиеся в жидкости, могут иметь высокие собственные периоды колебаний, кажется мало вероятным, но он подтвержден непосредственными наблюдениями Гензена ¹ над слуховым органом раков и наблюдениями Майера ² на усиках насекомых.

Многие исследователи пытались посредством воздействия сильного длительного тона определенной высоты произвести разрушение основной мембраны в узкой области и таким образом путем ряда опытов установить анатомическое распределение тонов по длине мембраны. Из-за возникновения воспалительных процессов, распространяющихся далеко от места первоначального воздействия, эти опыты не приводят к бесспорным выводам, но в общем тот факт, что низкие тона воспринимаются ближе к вершине, а высокие ближе к корню улитки, подобными опытами является несомненно подтвержденным. Выпадение известных тонов при проколе лабиринта иглой доказано недавно Андреевым ³ в лаборатории акад. Павлова по методу условных рефлексов; им же доказано, что собака ощущает разницу в 8 кол./сек.

Резонансная теория недавно получила прекрасное подтверждение также в опытах Гельда и Клейнкнехта ⁴. Эти авторы производили в лабиринте морской свинки ничтожное повреждение, просверливая сверлом 0,1 мм отверстие с таким расчетом, чтобы не повреждать слу-

¹ Hensen. Zeitschrift für wiss. Zoologie, 13, S. 319, 1863.

² A. Mayer. Sill. Journ., 8, p. 81, 1874.

³ Сборник, посвящ. акад. И. П. Павлову, 1925.

⁴ Held und Kleinknecht. Leipziger Ber., 77, S. 137. 1925; реферат Phys. Ber. 1926, S. 1479.

ховых нервов, а лишь ослабить натяжение слуховой мембраны путем ее разрыва. После этого у животного исчезало ощущение определенной высоты тона, что доказывалось по методу условных рефлексов. Когда повреждение заживало, ощущение тона опять восстанавливалось. Просверливание улитки ближе к основанию вызывало выпадение высоких тонов, ближе к вершине — выпадение низких.

Опыты Лэна¹ показывают, что к звукам выше 15 000 кол./сек. ухо становится резко менее чувствительным и теряет способность различать высоту тона. Чувствительность уха в пределах от 4 000 до 14 000 кол./сек. остается почти постоянной, выше же начинает резко падать. При 19 000 кол./сек., предельно слышимыми оказываются лишь звуки в миллион раз более интенсивные, чем при 14 000 кол./сек. Следовательно на интервале $\frac{19\,000}{14\,000} = 1,35$, то есть около одной трети октавы, чувствительность падает в 10^6 раз. При повышении интенсивности высоких звуков возникает ощущение неприятного щекотания в ухе, а затем чувство боли. У детей верхний предел слышимости доходит до 20 000 кол./сек. В связи с результатами последних работ возникают сомнения в правильности прежних определений верхней границы слуха, оценивающих ее в 40 000 и даже 50 000 кол./сек.²

Как уже указано, верхняя граница слуха немного выше у детей и достигает до 20 000 кол./сек.; у пожилых людей она постепенно понижается в связи с общим ослаб-

¹ C. Lane. Phys. Rev., 19, p. 492, 1922.

² С. Ржевкин и Н. Малов. Тел. и Телеф. бзз Пров., Дек. 1927.

лением слуха до 15 000 кол./сек. и ниже. Часто старые люди не слышат вовсе звука стрекотанья кузнечиков, цикад и сверчков и свиста выбрасываемого из котла пара. У животных верхняя граница слуха, вообще говоря, значительно выше, чем у человека, это доказано в лаборатории И. П. Павлова по методу условных рефлексов.

Все наблюдения, касающиеся верхней границы слуха, легко объяснить, принимая наличие слуховых волокон с настройкой только до 15 000 кол./сек. По мере повышения тона, действующего на ухо, и отдаления частоты его от резонанса с собственным периодом крайних волокон, колебания этих волокон делаются все более и более слабыми, но, увеличивая силу раздражающего звука, амплитуду колебаний все-таки можно довести до порога ощущения звука. Так как при воздействии частот выше 15 000 ощущение будет получаться лишь благодаря возбуждению самых крайних волокон, то изменение высоты звука очевидно не будет воспринято, что и подтверждается опытами. Согласно этому взгляду, верхний предел слуха должен зависеть от силы звука. Действительно Гильдемейстер¹ нашел, что усиление звука в 25 раз повышает верхнюю границу восприятия на полтона (1 000 кол./сек.), что хорошо согласуется с данными Лэна.

Верхний предел слышимости можно объяснить и иначе. Дело в том, что барабанная перепонка стоит под углом к слуховому проходу (см. рис. 1). При частоте тона 20 000 кол./сек., что соответствует длине волны около 0,6 см, на длине косо стоящей барабанной перепонки укладывается целая волна, и потому отдельные

¹ M. Gildemeister ZS. für Sinnesphysiol., Abt. II, Bd. 50, S. 161, 1918.

части ее будут испытывать противоположные воздействия, почему движение и не передается слуховым косточкам. Этого взгляда придерживается Лазарев. Возможно, что верхняя граница слуха обусловлена действием обеих указанных причин вместе. Решение вопроса мог бы дать опыт определения верхней границы слуха в воде, где длина волны в 4,5 раза больше, но пока такой опыт произведен не был. Кроме того в ограничении слышимости высоких звуков должна играть роль инерция жидкости лабиринта, влияние которой возрастает пропорционально квадрату частоты.

На основании опытов с заглушением (маскированием) одного звука другим Вегель и Лэн¹ выяснили — на каких участках слуховой мембраны происходит восприятие звуков той или другой высоты. На рис. 4 б показано это распределение частот по длине слуховой мембраны. Как мы видим из чертежа, тон 100 кол./сек. действует почти на самые крайние части мембраны близ геликотремы. Как же связать это с тем обстоятельством, что ухо воспринимает гораздо более низкие тона — 50, 30 и даже до 16 кол./сек.? Флетчер² объясняет этот факт тем, что низкие звуки легко вызывают ощущение субъективных обертонов, которых нет в возбуждающем колебании. Чем ниже звук, тем больше, повидимому, присуща уху эта способность создавать обертоны даже и при малой силе звука. Тон в 16 кол./сек., вероятно, сам по себе не может быть ощущаем ухом из-за отсутствия соответствующих волокон мембраны, но создаваемые им обертоны — 32, 48 и т. д. колебаний в секунду дают

¹ Wegel and Lane. Phys. Rev., 23, p. 266, 1924, Febr.

² H. Fletcher. Physical Measurements of Audition. Journal Frankl. Inst., 196, p. 289, 1923.

ощущение некоторого низкого звука. Из этих соображений следует, что нижайшие тона музыкальной шкалы ухо воспринимает лишь постольку, поскольку они возбуждают субъективные обертоны. Вот почему определение низшего предела слышимости в сущности невозможно. Понятна также и малая чувствительность уха в различении высоты низких тонов. Явление образования субъективных обертонов, равно как и комбинационных тонов, о которых речь будет далее, стоит в тесной связи с несимметричным строением барабанной перепонки. Барабанная перепонка состоит из радикальных волокон выпуклых кнаружи и имеет форму конуса, обращенного вершиной внутрь (рис. 1). Поэтому она гораздо легче поддается силе, втягивающей ее кнаружи, чем вдавливающей внутрь. В силу такого строения барабанной перепонки, звуковые колебания, особенно те, которые имеют большую силу, производят несимметричные перемещения этой перепонки внутрь и кнаружи, что и приводит, как показал теоретически еще Гельмгольц¹, к образованию субъективных комбинационных тонов и обертонов (см. гл. IV).

¹ H. Helmholtz. Die Lehre von den Tonempfindungen, S. 650, 887.

Глава II

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УХА. ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЕ И МЕДИЦИНСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СЛУХА. ТОНКОСТЬ СЛУХА

Изучение чувствительности уха к тонам различной высоты является основой большинства расчетов технической акустики и потому не следует удивляться, что этому вопросу уделено много внимания и труда рядом видных ученых. Условимся называть порогом слухового восприятия ту минимальную энергию звуковых колебаний (в эргах), протекающую в одну секунду через площадку в 1 см^2 , которая вызывает ощущение едва слышимого звука. Чувствительностью уха мы назовем тогда величину, обратную порогу слышимости. Так как чувствительность уха выражается большими числами и сильно меняется с высотой тона, то удобнее брать десятичный логарифм чувствительности. Так, например, если порог чувствительности уха $10^{-6} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ сек.}}$, то чувствительность выразится числом 10^6 , а логарифм ее числом 6.

Из прежних работ по определению чувствительности упомянем лишь классическую работу М. В и н а¹, впервые

¹ М. Wien. Pflügers Archiv, 97, S. 1, 1903.

определившего абсолютную величину порога слышимости при изменении частоты от 50 до нескольких тысяч колебаний в секунду; данные Вина приведены на рис. 5 в логарифмическом масштабе. Из кривой можно определить, что чувствительность достигает максимума при

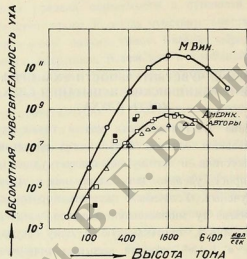


Рис. 5. Чувствительность уха по данным М. Вина и по новым данным.

- △ По данным Флетчера и Вегеля.
- " " Кранца.
- " " Свана.

2 300 кол./сек. На увеличенную чувствительность уха в области 2 000—3 000 колебаний указывает еще Гельмгольц, объясняя это резонансом слухового канала. Эти высокие звуки (начало 4-й октавы) действительно звучат для уха особенно резко. Любопытно отметить также тот факт, что как раз звуки с высотой около 2 500 кол./сек. применяют для подводных сигналов цей-

лонские туземцы, сингалезы, искатели жемчуга. Данные Вина послужили исходным пунктом для определения наивыгоднейшей высоты тона в современных установках для подводной сигнализации.

Максимум чувствительности, найденный Вином, был обнаружен также и позднейшими исследователями, что же касается абсолютной величины чувствительности, то здесь в измерениях Вина повидимому имеется серьезная ошибка. Новые исследования ¹, произведенные чрезвычайно тщательно и совершенно различными методами и прекрасно согласующиеся друг с другом (рис. 5), при высоких частотах дают величины чувствительности, в тысячу раз меньшие, чем те, которые были получены Вином. По данным Вина, при изменении частоты от 50 до 2 000 кол./сек. чувствительность увеличивается в 100 миллионов раз: по новейшим же данным, она увеличивается примерно в 500 000 или миллион раз, т. е. в 100—200 раз меньше.

Из методов определения порога слышимости я упомяну лишь о методе термофона ², ввиду его особой убедительности. Термофон представляет собой тонкий металлический листок или проволочку, накаливаемую переменным током, что вызывает периодические расширения воздуха и порождает звук небольшой силы. Сила звука зависит от объема камеры, в которую поступают колебания. Если термофон, помещенный в камеру, плотно

¹ E. Wente. Phys. Rev., 19, p. 666; Kranz, Phys. Rev., 21, p. 573, 1923; 22, p. 66, 1923; Fletcher and Wegel, Phys. Rev., 19, p. 555, 1922.

² H. Arnold and I. Crandall, Phys. Rev., 10, p. 22, 1917; I. Crandall, Phys. Rev., 11, p. 449, 1918.

прижать к уху или монтировать в капсуле, вставляемой в слуховой канал, то, зная объем камеры, силу тока, проходящего через термофон, и размеры накаливаемого листка, можно вычислить силу звука в ухе в абсолютных единицах, даже при самых слабых звуках на пороге слышимости. При измерении же по методу Вина, при помощи телефона, силу звука на пороге слышимости удавалось определить лишь при помощи экстраполяции со стороны более сильных звуков, что и привело, повидимому, к значительным ошибкам.

Громадную разницу в чувствительности между высокими и низкими тонами в 8 логарифмических единиц (см. рис. 5), т. е. в сто миллионов раз, весьма трудно объяснить с точки зрения резонансной теории, на что указал еще сам Вин¹.

Интересно указать, что порог чувствительности уха в области высоких тонов (2500 кол./сек.) составляет примерно $10^{-9} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{сек.}}$, что как раз равняется наибольшей чувствительности глаза в области зеленых лучей. Ухо и глаз являются, таким образом, органами одинаковой абсолютной чувствительности. Амплитуда колебаний частиц воздуха при звуке в 2500 кол./сек. с интенсивностью $10^{-9} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{сек.}}$ составляет менее 10^{-9} см, или около 1/100 части диаметра молекулы воздуха.

Наиболее надежные данные по определению порога слышимости использованы для составления графика

¹ M. Wien. Festschrift für Wüllner. Ein Bedenken gegen Helmholtzchen Theorie des Hörens.

рис. 6. Нижняя кривая дает величину порога слышимости в эргах звуковой энергии на 1 см^2 в сек., в зависимости от высоты тона; часть кривой в области тонов от 50 кол./сек. и ниже проведена пунктиром, чтобы указать менее надежный характер измерений в этой области, близкой к нижнему пределу слуха.

Прежние определения верхнего предела слышимости¹, оценивавшие его в 40 — 50 000 кол./сек. и даже выше,

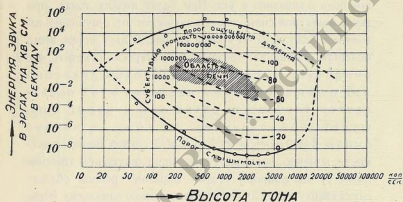


Рис. 6. Область слухового восприятия (по Вегелю и Лэну).

вряд ли могут быть признаны бесспорными, как в виду того, что не было произведено измерения силы звука и не была гарантирована его высота, так и вследствие противоречивости результатов, полученных различными авторами. Исследования Лэна², который применил в качестве источника звука мощный телефон особой конструкции, питаемый генератором высокой частоты с

¹ R. König. Wied. Ann., 69, S. 626 u. 723, 1899; M. Th. Edelmänn, Drude Ann., 2, S. 469, 1900.

² C. Lane. Phys. Rev., 19, p. 492, 1922.

катодной лампой, показали, что чувствительность к тонам от 4 000 до 15 000 кол./сек. почти одинакова и близка к 10^7 , выше же 15 000 кол./сек. она сразу резко падает и при 19 000 кол./сек. составляет только 10, т. е. на интервале $1/3$ октавы она уменьшается в миллион раз (рис. 6). Определение порога слышимости при более высоких тонах оказывается невозможным, так как ранее, чем наступает ощущение звука, получается ощущение боли и давления в ухе. При более низких тонах, при звуке известной силы, также получается это ощущение давления и боли; верхняя кривая на рис. 6 дает порог этого болевого ощущения. Чрезвычайно интересно отметить, что амплитуда переменных звуковых давлений при ощущении боли и давления в ухе оказывается того же порядка, как и порог ощущений при давлении на кожу, а именно около $1\,000 \text{ дин/см}^2 \approx 1 \text{ гр./см}^2$. У глухих порог слышимости, конечно, повышается, но порог ощущения давления имеет ту же величину. Таким образом граница области слуха сверху у всех людей приблизительно одинакова. Верхняя и нижняя кривые на рис. 6 охватывают некоторую площадь, включающую в себя все звуки, которые человеческое ухо воспринимает. Эту площадь естественно назвать областью слухового восприятия.

Приведенные на рис. 5 и 6 данные о чувствительности уха представляют результат статистического исследования большого числа людей. Исследования Минтона¹ и Кранца² показали, что индивидуальная чувствительность может чрезвычайно разниться от средней. Наблюдаются случаи резких минимумов или макси-

¹ J. Minton. Phys. Rev., 19, p. 80, 1922.

² F. Kranz, Phys. Rev., 22, p. 66, 1923; 21, p. 573, 1923.

мумов чувствительности на протяжении интервала в один музыкальный тон, т. е. при изменении частоты всего на 12⁰/₀. Это явление качественно наблюдал еще Бецольд (1900). Чувствительность сплошь и рядом изменяется при этом в сотни раз. Обнаружено также, что известные заболевания уха вызывают понижение чувствительности слуха в определенной области высот. При склерозе уха, когда перепонка овального окна благодаря

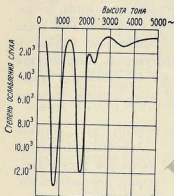


Рис. 7. Ослабление слуха при склерозе уха.

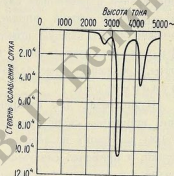


Рис. 8. Ослабление слуха при поражении слухового нерва.

отложению известковых солей делается твердой и неэластичной, обычно замечается ослабление слуха на низких тонах, а также резкие провалы чувствительности (в сотни и тысячи раз) в средней области тонов. Болезни внутреннего уха влекут за собой вначале большей частью выпадение самых верхних тонов, что обусловлено повидимому тем, что болезненные процессы начинаются со стороны среднего уха, то есть захватывают в первую очередь часть улитки около основания, где воспринимаются высокие тоны. На рис. 7 и 8 даны

кривые, взятые из работы Минтона, характеризующие степень ослабления слуха в случае болезни среднего уха (рис. 7) и поражения слухового нерва (фиг. 8). Таким образом исследование остроты слуха может служить врачу как для постановки диагноза болезни, так и для определения степени глухоты.

Объективное исследование слуха лиц определенных профессий как-то: радио-слухачей, телеграфистов, принимающих на слух (клопферистов), музыкантов, шоферов, врачей и различных слухачей в военном деле стало в настоящее время вполне осуществимой задачей и должно играть важную практическую роль. Американская фирма Вестерн Электрик К^о выпускает аппараты, предназначенные для этой цели, носящие название аудиометров.

В аппаратах для измерения остроты слуха, которые мне пришлось сконструировать в Акустическом Отделе ГЭИ для своих исследований, а также для ряда учреждений, я применял следующую систему: переменный ток силой i и частоты f от генератора с катодными лампами, дающего чисто синусоидальный ток (благодаря применению фильтров), проходит в термофон с очень тонким платиновым листком, через который одновременно протекает постоянный ток силы I . Цепь постоянного тока защищена от переменного дросселем, цепь переменного от постоянного — электролитическим конденсатором (емкостью в несколько сот микрофард), свободно пропускающим переменный ток звуковых частот. Эффективная величина звукового давления P на пределе слышимости подсчитывается по формуле:

$$P \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} = A \frac{i}{f^3}, \quad (1)$$

причем A — постоянная величина, равная для платинового термофона:

$$A = \frac{1,22 \cdot 10^6}{\left(\frac{273}{\theta}\right)^{3/4} \left(1 - \frac{\theta}{1000}\right) t_{\mu}} \left(\frac{RI}{V}\right), \quad (2)$$

где R — сопротивление термофона при той температуре, до которой металлический листок нагревается постоянным током I , V — объем в см^3 , камеры термофона вместе с ушным каналом, θ — температура термофона, определяемая предварительным опытом (из повышения сопротивления под действием тока данной силы) и t_{μ} — толщина листка в микронах.

Наиболее удобно применять платиновый листок, толщиной в $0,001$ мм (воластонова жесть), имеющий еще достаточно однородную структуру, несмотря на большую тонкость. Такой термофон может давать достаточно громкие звуки, чтобы их слушали лица с поврежденным слухом, и в то же время позволяет свести силу звука до ничтожной, но все же легко измеримой величины. Обязательным условием точности приведенной выше формулы, а также отсутствия обертонов является малая сила переменного тока i по сравнению с силой постоянного тока I ; i не должно быть более $1/10$ I .

Интенсивность звука рассчитывается по формуле:

$$J = 2,45 \cdot 10^{-2} P^2 \quad (\text{см. гл. III}). \quad (3)$$

Найденные величины чувствительности уха удобно нанести на график рис. 9, представляющий из себя перевернутый график рис. 6 (с более мелким масштабом). На этом графике верхняя кривая дает чувствительность уха на пороге слышимости, нижняя — чувствительность восприятия болезненно-сильных звуков.

Если ухо обладает каким-нибудь дефектом, то восприятие части тонов по высоте или по силе отпадает, часть слуховой области выпадает из восприятия и ухо воспринимает количество тонов, меньше нормального. Определив чувствительность больного уха и нанеся ее в виде кривой (рис. 9) на одном листе с нормальной

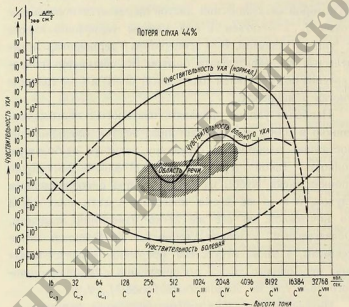


Рис. 9. График для записи результатов исследования слуха.

областью слухового восприятия, мы сразу составляем себе представление, какой процент всего слуха сохранился у исследуемого уха. Процент потерянного слуха будет равен отношению площади между кривой чувствительности данного уха и кривой нормальной чувствительности ко всей площади нормального слухового восприя-

тия. На приведенном чертеже мы имеем характеристику глухого уха, у которого потеряно 44 % слуха.

Лица с хорошим слухом обладают (в области речи) порогом слышимости порядка $0,001 \text{ дин/см}^2$ (величина переменного звукового давления, соответствующая интенсивности $2,45 \cdot 10^{-8} \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{сек.}}$); при повышении порога слы-

шимости до $0,1 \text{ дин/см}^2$ мы имеем дело с легкой глухотой; сильная глухота, допускающая все же разговор, соответствует порогу в 1 дин/см^2 . При пороге в 10 дин/см^2 разговор может быть понят лишь при усилительных приспособлениях. Давления в 1000 дин/см^2 уже дают ощущение боли, поэтому глухота, которая соответствует порогу более 100 дин/см^2 , уже не может быть исправлена никакими усилителями звука.

Второй важный вопрос при изучении слуха — это вопрос о тонкости слуха, т. е. о способности различать небольшие изменения высоты тона. Детальное исследование Кнудсена¹ показало, что тонкость слуха на высоких тонах от 500 до 2000 кол./сек. (от C^2 до C^4) оказывается почти одинаковой и равной около 0,3 % или $\frac{1}{40}$ музыкального тона. Так, например, при 1000 кол./сек. ухо распознает изменение высоты на 3 колебания, при 2000 кол./сек. — на 6 колебаний. В сторону низких тонов тонкость слуха постепенно падает и при 50 кол./сек. достигает 1 % или $\frac{1}{12}$ целого тона. Лица с особенно тонким слухом часто различают еще меньшие изменения высоты.

Тонкость слуха, вероятно, зависит от структуры слуховой мембраны. Мембрана, волокна которой слабо

¹ V. O. Knudsen, Phys. Rev., 21, p. 84, 1923.

связаны и могут колебаться независимо друг от друга, дает тонкий музыкальный слух; наоборот, грубая и неподатливая слуховая мембрана не позволяет возникать тонким изменениям ее формы и будет приходить в колебание сразу на большом участке и при этом возбуждать несколько нервных окончаний; это соответствует немusическому слуху, обладатель которого не способен различать даже звуки, разделенные большими интервалами. Упражнение делает слуховую мембрану более гибкой, ослабляя, повидимому, связь между ее волокнами, вследствие чего слух улучшается; здесь происходит процесс, который можно уподобить обыгрыванию скрипки. Данные Кнудсена позволяют подсчитать, что при средней силе звука ухо может различить около 1 500 градаций по высоте в интервале от 32 до 5 000 кол./сек. Тот же автор определил тонкость слуха в отношении оценки силы звука. Для звуков в средней части музыкальной шкалы порог едва заметного ощущения изменения силы звука соответствует изменению интенсивности на $10^0/0$, изменение на $25^0/0$ — заметно отчетливо. При слабых звуках (близ порога слышимости) ухо едва ощущает лишь гораздо большие изменения интенсивности (около $30^0/0$). Из этих данных можно рассчитать, что при 1 000 кол./сек. ухо сможет воспринять 270 градаций силы звука от порога слышимости до порога ощущения давления. Если принять в расчет способность уха воспринимать изменения и силы, и высоты звука, то можно подсчитать, что в пределах всей области звукового восприятия ухо ощущает около 300 000 различных по силе и высоте тонов. Таким образом мы имеем огромное разнообразие в восприятии звуков. Ввиду того, что в

ухе имеется всего около 4 000 нервных волокон, из которых каждое способно передать лишь определенное воздействие мозгу, без каких-либо градаций (закон специфических энергий), объяснение всего разнообразия звукового восприятия — по высоте и по силе звука — представляет большие трудности.

СОУНЬ ИМ. В. Г. БЕЛИНСКОГО

ОТРАЖЕНИЕ ВРЕМЕНА
БУДУЩЕГО
И МЕНЯ
В. Г. БЕЛИНСКОГО
Свердлов

Глава III

ГРОМКОСТЬ ЗВУКА. ЗАКОН ВЕБЕРА-ФЕХНЕРА. ЭМПИРИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ ГРОМКОСТИ СЛОЖНЫХ ЗВУКОВ. ИОННАЯ ТЕОРИЯ СЛУХА

Силой или интенсивностью звука называют количество звуковой энергии (в эргах), протекающее через площадь в 1 см^2 в 1 сек. В свободно распространяющейся волне данной силе звука соответствует определенная величина колебаний давления (выше и ниже нормального). Связь между силой звука J в $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ сек.}}$ и эффективной (или средней квадратичной) величиной давления P выражается формулой:

$$P \frac{\text{дин}}{\text{см}^2} = 6,4 \sqrt{J \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ сек.}}}$$

и пояснена таблицей на след. странице.

Предположим, что мы имеем ряд звуков одинаковой интенсивности и различных высот. Будут ли эти звуки одинаково громки субъективно? Ясно без дальнейших пояснений, что их громкость для уха будет не одинакова. В настоящее время в звуковой технике применяются мощные звуки, имеющие частоту в несколько десятков и даже сотен колебаний в секунду (ультра-звуки), а также звуки с очень медленными ко-

Сила звука в $\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ сек.}}$	Переменное звуковое давление в дин/см^2	Субъективная громкость, соответствующая данной интенсивности (в средних высотах)
1 000 000	6400	Ощущение боли и давления.
10 000	640	Очень громкий звук (фортиссимо оркестра).
100	64	Крик
1	6,4	Речь средней громкости.
0,01	0,64	Тихий разговор.
0,0001	0,064	Тиканье часов.
0,000001	0,0064	Едва слышный звук.

лебаниями (инфра-звуки) — эти звуки совсем не воспринимаются ухом, как бы они ни были сильны. Но и звуки, лежащие в пределах слышимости, при одинаковой интенсивности могут иметь совершенно различную громкость, что обусловлено различной чувствительностью уха к звукам разных высот. Так, например, звук с силой в $0,0001 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \text{ сек.}}$ при 50 кол./сек. лежит ниже порога слышимости (см. рис. 6), а звук в 200 кол./сек. при той же силе будет довольно громко слышим ухом.

Каким же образом можно оценить субъективную громкость звука? Согласно общему психо-физическому закону Вебера - Фехнера прирост силы ощущения пропорционален логарифму отношения раздражений. Если мы будем считать, что на пороге слышимости, при силе звука J_0 , ощущение (в данном случае громкость) равно нулю, то при некоторой силе звука J громкость выразится следующей формулой (одинаковой для всех видов ощущений):

$$S = K \lg_{10} \frac{J}{J_0} \quad (1)$$

где K — множитель пропорциональности, определяемый выбором единицы для измерения S .

Таким образом естественной мерой громкости тона, повидимому, может служить логарифм отношения интенсивности данного тона к его интенсивности при пороге слышимости. Ввиду произвольности выбора единицы для такой объективно неизмеримой величины, как громкость, можно условно положить K равным любой числовой величине. Мы, конечно, не знаем наперед, одинакова ли величина K для тонов разных высот. Кроме того, вблизи порога слышимости всегда наблюдаются отклонения от закона Вебера-Фехнера (и формула (1) тогда не верна). Таким образом мы не можем быть уверены, будет ли число S вполне точно определять субъективное ощущение громкости и будут ли вычисляемые таким образом громкости сравнимы при тонах разных высот, однако число S , несомненно, верно дает приближенную оценку громкости. Число S представляет измеримую объективно величину, дающую в логарифмических единицах отношение интенсивности данного звука к интенсивности едва осязаемого звука той же высоты и потому может служить не только мерой громкости, но и условной мерой относительной силы звука, причем прирост S на известное число единиц выше нулевого уровня будет означать увеличение силы звука в известное число раз. Нулевой уровень для учета силы звука мы можем, конечно, выбрать любой ¹, для учета же громкости мы должны вести

¹ Американские авторы отсчитывают его, напр., по отношению к тону 700 кол./сек., имеющему интенсивность, выражаемую давлением в 1 дину на см².

отсчет от порога слышимости, где сила звука равна J_0 . Ввиду того, что число S не выражает еще самую громкость звука, мы будем в дальнейшем называть эту величину уровнем ощущения, отличая ее от громкости. Как мы далее покажем, удобно положить постоянную K в формуле (1) равной 10 и считать

$$S = 10 \lg_{10} \frac{J}{J_0}. \quad (2)$$

Если данный тон имеет интенсивность в 10 раз большую, чем при пороге слышимости, то в системе, выражаемой формулой (2), его уровень ощущения выразится условно числом 10. Если интенсивность данного тона не достигает порога слышимости, то S будет меньше нуля. Так как отрицательная громкость не имеет реального смысла, то мы условимся считать, что при $J < J_0$, так же как и при $J = J_0$, громкость равна 0 и от этого нулевого уровня будем отсчитывать уровни ощущений.

Интенсивность звука, как мы видели, пропорциональна квадрату звукового давления P , следовательно:

$$S = 10 \lg_{10} \frac{J}{J_0} = 10 \lg_{10} \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \lg \frac{P}{P_0}, \quad (3)$$

где P_0 — звуковое давление на пороге слышимости.

Высота уровня ощущения дает довольно верное представление о громкости, и величину эту часто называют (не вполне законно) громкостью звука. Система расчета прироста громкости и силы звука по формулам (2) и (3) введена американскими авторами и получила право гражданства в практической телефонии для учета ослабления телефонной передачи вдоль линий, а также и в других случаях. Если $\lg_{10} \frac{J_2}{J_1} = 0,1$, что соответствует отно-

шению интенсивностей $\frac{J_2}{J_1} = 1,26$, то мы имеем прирост уровня ощущения S на единицу. Эта единица названа „единицей передачи“ и обозначается TU (Transmission Unit). Единицы TU удобны тем, что все практически интересные звуки выразятся числами в пределах уровней от 0 до 130 TU , причем для вопросов практической телефонии имеет смысл брать лишь целые числа, так как прирост интенсивности в 1,10 раз (на 10%), соответствующий 0,5 TU , лежит на пределе различимости.

Опытную основу изложенного приближенного расчета громкости дало исследование Мэккензи¹, который измерил, при каких отношениях интенсивностей оказываются одинаково громкими звуки разных высот; в этих измерениях он пользовался особого рода фонометром, в котором к уху подводятся в быстром чередовании (25 раз в секунду) два разных звука. Из этой работы вытекает, что если чистые тоны, разных высот и одинаково громкие, имеют определенное отношение интенсивностей, то, будучи усилены в одно и то же число раз, они также останутся одинаково громкими для уха.

На рис. 6 пунктиром вычерчен ряд кривых линий, проведенных на равных расстояниях друг от друга и параллельных кривой порога слышимости. Так как на чертеже сила звука отложена в логарифмическом масштабе, то эти кривые соответствуют звукам, в определенное число раз (в 100, 10 000, 1 000 000 и т. д.) более сильным, чем при пороге слышимости, т. е., по

¹ D. Mackenzie. Phys. Rev., 20, p. 331, 1922.

Мэккензи, одинаково громким субъективно. Уровни громкости (направо) проставлены по американской шкале. Звуки, причиняющие болезненное ощущение давления, имеют при 50 кол./сек. уровень около 50 *TU*, при 1 000 кол./сек. это ощущение получается при уровне громкости в 130 *TU*, т. е. при звуке в 10 миллиардов раз более сильном, чем звук на пороге слышимости. Область речи лежит в пределах от 50 до 80 *TU*; она на чертеже заштрихована и занимает, как мы видим, лишь небольшую часть всей области слухового восприятия. Звуки, применяемые в оркестре, изменяются по силе примерно в 10^6 раз, что соответствует 60 *TU*, т. е. дает 60 градаций громкости, хорошо заметных уху. В музыке, как известно, приняты 5 обозначений громкости: fortissimo (ff), forte (f), mezzo forte (mf), piano (p), pianissimo (pp). Таким образом музыкальная градация громкости будет равна 15 *TU*, т. е. усилению звука примерно в 32 раза, но практически, конечно, применяются гораздо более тонкие оттенки.

Из рисунка 6 легко видеть, что в области высоких тонов ухо способно воспринимать и оценивать звуки, различающиеся по интенсивности более чем в 10^{13} раз (130 *TU*). Этот факт с физической точки зрения является совершенно изумительным, ибо лучшие измерительные приборы едва могут сравнивать величины, различающиеся друг от друга в 10^4 раз (напр. мостик Витстона). Причина приспособляемости уха в столь широких границах лежит в наличии особого регулирующего чувствительность уха механизма, в виде мускула, натягивающего барабанную перепонку (*m. tensor tympani*). Натяжение барабанной перепонки происходит совершенно инстинктивно¹

¹ W. Köhler. ZS. für Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorgane, 54, S. 241, 1909.

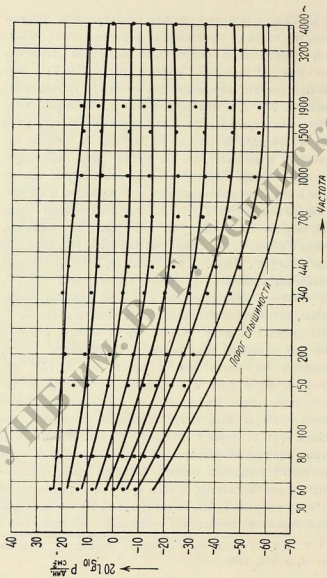


Рис. 10. Уровни равной громкости по Кингсбери.

и тем сильнее, чем интенсивнее звук. Таким образом вся система становится для сильных звуков менее чувствительна, что служит защитным приспособлением от действия чрезмерно сильных звуков.

В недавно появившейся работе, Кингсбери¹, в противоречие с данными Мэккензи, нашел, что у низких тонов при увеличении силы звука громкость растет значительно быстрее, чем у высоких. Так, если при пороге слышимости, тон в 60 кол./сек. оказывается в 10^5 раз сильнее, чем тон в 2 000 кол./сек., то на уровне разговорной речи, при условии одинаковой громкости, он будет всего в 10 раз сильнее тона в 2 000 кол./сек. Для достижения одинаковой громкости тон в 60 кол./сек. приходится при этом усилить в 10^4 раз (40 *TU*), а тон в 2 000 кол./сек. в 10^8 раз (80 *TU*) по отношению к порогу слышимости. Главные данные работы Кингсбери ясны из рис. 10, где нанесены определенные им кривые равной громкости. Как мы видим, они идут не параллельно кривой порога слышимости, как это было на рис. 6, а в области низких тонов располагаются гораздо теснее, чем в области высоких; из кривых видно, что в интервале от 700 до 4 000 кол./сек. кривые идут почти параллельно друг другу, т. е. определение громкости по формуле (2) дает здесь сравнимые при разных высотах результаты, но ниже этой области нам придется по мере понижения тона придавать постоянной *K* в законе Вебера-Фехнера все большие и большие значения и если при высоких тонах мы положим $K=10$, то при частоте 50 кол./сек. *K* придется положить равным около 20. Таким образом ясно, что числа,

¹ B. Kingsbury. Phys. Rev., 29, p. 588, 1927.

выражающие уровень громкости S в TU (формула 2), не могут годиться для сравнения громкостей тонов различных высот, или, вернее, это допустимо лишь в области от 700 до 4000 кол./сек. Громкость является довольно сложной функцией числа S , вид которой зависит от высоты тона. В дальнейшем мы будем громкость обозначать символом L , в отличие от величины S , вычисляемой по формуле (2) и дающей лишь „уровень громкости“.

Истинной единицей громкости следует, конечно, считать едва ощутимый прирост громкости, но эта единица практически мало удобна. Как показывают упомянутые в предыдущей главе измерения Кнудсена, едва заметный прирост громкости на пороге слышимости соответствует относительно значительно большему увеличению силы звука, чем при звуках большей громкости (в три раза). При увеличении силы звука получается постоянная чувствительность к изменению силы звука (около $10^0/0$), одинаковая для тонов всех высот; для тона 1000 кол./сек. это имеет место уже при силе звука в $0,06 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$, при тоне же 100 кол./сек. только

при $4 \frac{\text{дин}}{\text{см}^2}$. Но вблизи от порога слышимости едва заметен лишь прирост силы звука на $30^0/0$. Ясно поэтому, что при увеличении силы звука, начиная от порога слышимости, вначале мы будем иметь при едва заметном увеличении громкости (то есть при истинном приросте громкости на единицу) больший прирост интенсивности (примерно $1,2 TU$), чем при звуках значительной громкости ($0,4 TU$). К этому вопросу мы вернемся позднее в связи с ионной теорией слуха.

На основании данных Кнудсена можно постепенно вычислить, скольким единицам действительной громкости будет соответствовать звук, лежащий на определенное число TU выше порога слышимости, и таким образом построить графически зависимость субъективной громкости от числа S . Кингсбери выполнил такое вычисление и показал, что громкость низких тонов растет с увеличением силы тона, примерно, вдвое быстрее, чем громкость высоких, что вполне согласно с его наблюдениями; громкости тонов от 700 до 4000 кол./сек. возрастают почти тождественно, что также согласно с опытом.

Баркгаузен¹ строит, на аналогичном с американскими авторами принципе, систему измерения громкости сложных звуков, в которой громкость измеряется степенями числа 2 (а не 10), и называет единицу измерения „фон“ (очевидно, что 1 фон $\leq 3TU$). В этой системе наиболее громкие звуки, причиняющие боль, по данным Баркгаузена, выражаются числом 14 фон. Баркгаузен предложил весьма удобный фонометр для сравнения громкостей, состоящий из источника звука постоянной силы (особого рода зуммер с телефоном) и приспособления для ослабления его в 1, 2, 4, 8, 16 и т. д. раз. Внешний звук сравнивается с эталоном с точностью до 50%, и громкость его оценивается по шкале сразу в „фонах“. Ясно, что в „фонах“ так же, как и в TU , выражается не истинная громкость, а только „уровень ощущения“.

На вопросе о громкости сложных звуков, состоящих из некоторого числа созвучающих простых тонов, интересно остано-

¹ Н. Barkhausen. ZS. für techn. Physik. VII, S. 599, 1926.

виться несколько подробнее. Флетчер и Штейнберг¹ дали эмпирическую формулу, основанную на обширном опытно-материале, которая позволяет, зная „звуковой спектр“, то есть распределение интенсивности по частотам, подсчитать громкость сложного звука путем суммирования выражений, яв-

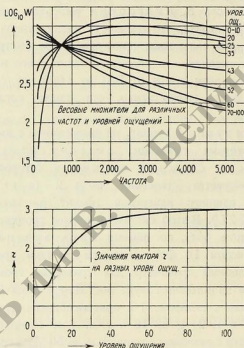


Рис. 11. Графики для нахождения громкости сложного звука по силе его компонентов.

ляющихся функцией интенсивности отдельных компонент звука. Формула Флетчера-Штейнберга имеет следующий вид:

$$L = 10 \frac{r^2}{3} \lg_{10} \sum (W_i P_i)^{2/r}, \quad (4)$$

¹ H. Fletcher. Steinberg. Phys. Rev., 24, p. 306, 1924.

где Σ означает знак суммы, распространяющийся на значения индекса i для всех компонент данного сложного звука. Таким образом громкость определяется логарифмом от суммы выражений вида: $(W_i P_i)^{1/r}$, умноженным на $\frac{10}{3} r^2$; здесь P_i — компонента звукового давления для составляющих тонов, определяемых из „звукового спектра“; r есть функция уровня ощущения сложного звука, определяемого из выражения (1):

$$S = 20 \lg_{10} \frac{P}{P_0},$$

где P — эффективная величина суммарного звукового давления сложного звука, а P_0 — тоже на пороге слышимости. Для нахождения величин r и W_i при разных высотах и силах звука имеются специальные графики (рис. 11). Фактор r от высоты не зависит: он имеет величину, равную единице при слабых звуках, близких к порогу, затем постепенно растет и для громких звуков приближается к 3. Величины W_i могут быть называемы весовыми множителями. Для слабых звуков W_i равняется $\frac{1}{P_{i0}}$, где P_{i0} порог слышимости (в динах на см^2) для тона данной высоты. Для сильных звуков значения весовых множителей совершенно меняются, благодаря возникновению комбинационных тонов. Весовые факторы низких тонов по мере увеличения их интенсивности быстро возрастают, высоких тонов — наоборот, падают. Таким образом для слабых звуков, при $r = 1$, мы должны составить сумму выражения вида:

$$\left(\frac{P_i}{P_{i0}} \right)^2$$

(где P_{i0} — звуковое давление при пороге слышимости) и затем взять кубический корень из логарифма суммы этих выражений. Для одиночного тона малой громкости мы будем иметь, следовательно, для расчета громкости такую формулу:

$$L = 10 \lg_{10} \sqrt[3]{\frac{P^2}{P_0^2}} = \frac{10}{3} \lg_{10} \frac{J}{J_0}, \quad (5)$$

отличающуюся от формулы (2) знаком кубического корня под логарифмом, то есть множителем $1/3$. Таким образом эмпириче-

ская формула Флетчера-Штейнберга дает для слабых звуков значение субъективной громкости, в три раза меньшее, чем формула (2). Это вполне понятно, так как, по наблюдениям Кнудсена, вблизи порога слышимости относительный прирост силы звука $\frac{\Delta J}{J}$ при едва заметном приросте громкости оказывается в 3 раза больше, чем при громких звуках. Для больших интенсивностей ($r=3$) громкость одиночного тона выразится формулой:

$$L = 10 \lg_{10} (W_i P_i)^{\frac{2}{r} \cdot \frac{r^3}{3}} = 10 \lg_{10} (W_i P_i)^2 = 20 \lg_{10} \frac{P_i}{(1/W_i)^2}, \quad (6)$$

то есть мы имеем здесь выражение, приближающееся по типу к (3), но только вместо рубежной величины интенсивности P_0 здесь входит иная величина $\left(\frac{1}{W_i}\right)$, зависящая, своеобразно для каждого тона, от уровня громкости. Этот факт интересно сопоставить с излагаемой далее ионной теорией слуха, развитой Лазаревым.

Проверку формулы Флетчера-Штейнберга произвел, на основании своих измерений, Кингсбери и нашел хорошее согласие с опытом, за исключением самых высоких частот, где получаются расхождения. Совершенно иные взгляды на громкость сложных звуков развиты Баркгаузен¹ и Штумпфом². Эти авторы считают, что громкость звука всецело определяется громкостью наиболее сильного физиологически (наивысший уровень громкости S) обертона, другие же обертоны к громкости ничего не прибавляют.

Несомненно, что в этой интересной области многое еще не выяснено и многое остается сделать.

В той трактовке вопроса, как это изложено выше, совершенно не принята во внимание утомляемость слуха под действием длительного воздей-

¹ H. Barkhausen u. G. Lewicki. Phys. ZS., 25, S. 537, 1924.

² C. Stumpf. Die Sprachläute, S. 305, Berlin, 1926.

ствия звука, то есть адаптация к звуку. Как показал Лазарев¹, исходя из ионной теории возбуждения, под действием длительного звука должно происходить разложение звукочувствительного вещества в слуховом нерве, что влечет за собой постепенное уменьшение чувствительности по экспоненциальному закону. По окончании воздействия звука, чувствительность восстанавливается также постепенно в течение довольно долгого времени, измеряемого десятками секунд и даже минутами. Эти выводы проверены Беликовым на опыте для тонов выше 1 000 кол./сек. 39082

Если сила звука и время его воздействия достаточно велики, то окончательная чувствительность при полной адаптации обратно пропорциональна силе звука. Это значит, что при длительном слушании сильных звуков наше ухо теряет свою чувствительность и не воспринимает эти звуки очень громкими. Наоборот, после промежутка полной тишины, когда чувствительность вполне восстановлена, громкость звуков будет казаться чрезвычайно повышенной. Здесь, повидимому, кроется вторая причина удивительной приспособляемости слуха к воздействию звуков разной силы. Несомненно также, что понятие о громкости, вытекающее из закона Вебера-Фехнера (форм. 1 и дальнейшие), с точки зрения ионной теории должно быть совершенно пересмотрено. Если считать, как это вытекает из теории Лазарева, что чувствительность изменяется обратно пропорционально силе длительного звука, т. е. порог слышимости вырастает вместе с силой звука: $J_0 = aJ$, где a — постоянная величина,

¹ П. Лазарев. Изв. Физ. И-та при Моск. Научн. Инст., т. I, вып. I, 1919.

то громкость, вычисляемая по форм. (1) (причем под J_0 будет подразумеваться порог слышимости, соответствующий данному моменту, т. е. данной степени адаптации органа слуха), окажется постоянной величиной, независимой от силы звука. Таким образом теория адаптации приводит к парадоксальному выводу, что субъективная громкость не может превзойти известного предела, сколь сильно ни повышается интенсивность звука. Возможно, что эмпирическая формула Флетчера-Штейнберга (4) отчасти учитывает влияние адаптации, так как весовые факторы высоких тонов (выше 1 000 кол./сек.) для сильных звуков резко падают. Например, для тона в 3 000 кол./сек. весовой фактор W для уровня ощущения, равного 100 TU , уменьшается в 10 раз (см. рис. 11), что соответствует кажущемуся возрастанию порога слышимости в 100 раз. Для низких тонов весовые факторы, наоборот, немного возрастают по величине, т. е. влияния адаптации как будто бы не обнаруживается. Необходимо указать, что теория развитая Лазаревым не учитывает образования сильных в низком регистре комбинационных тонов; опытная проверка для низких тонов сделана также не была.

Принимая во внимание, что в окончаниях слуховых нервов должна всегда, даже в отсутствии звука, иметься некоторая доля раздражающих ионов, действие которых суммируется с действием внешнего звука (собственный звук улитки, аналогичный собственному свету сетчатки), Лазарев пишет закон Вебера-Фехнера, в дифференциальной форме, таким образом:

$$\frac{\Delta J}{J+\beta} = A, \quad (7)$$

где β — собственный звук улитки. Величина раздражения, соответствующая собственному звуку улитки, вообще говоря, очень мала; по опытам Беликова¹, она для тона 1050 кол./сек. в два раза больше, чем требуется для едва заметного ощущения звука, и поэтому для сильных звуков закон Вебера-Фехнера практически сохраняет свою обычную форму, но вблизи порога слышимости мы должны получить уменьшение чувствительности уха, так как для получения постоянного отношения (A) в законе Вебера-Фехнера придется дать больший прирост силы звука ΔI , чем в отсутствии собственного звука улитки β . Этот вывод теории прекрасно объясняет уменьшение чувствительности к приросту громкости вблизи порога слышимости; опытные данные Беликова, полученные в 1919 г., позволяют подсчитать, что чувствительность к приросту силы звука возрастает в три раза, что вполне согласуется с позднейшими данными Кнудсена². Собственный звук улитки (β) принимает в некоторых случаях чрезвычайно большую величину (звон в ушах), что часто вызывается патологическими причинами и всегда влечет за собой понижение чувствительности слуха. После воздействия сильных звуков звон в ушах может наблюдаться в течение многих дней; так, Беликов наблюдал звон в ушах в течение 17 дней после воздействия сильного тона в 1050 кол./сек., причем величина β возросла с 0,10 до 2,3, а затем постепенно до 10, т. е. в 100 раз; после прекращения звона в ушах β снова упала до 0,3. Величина константы A ,

¹ См. П. Лазарев. Изв. Физ. И-та при МНИ, т. I, вып. III, стр. 120 и т. I, вып. IV, стр. 152.

² V. Knudsen. Phys. Rev., 21, p. 84, 1923.

зависящая от мозговых центров, меняется сравнительно немного.

Все опытные исследования громкости, о которых речь шла выше, совершенно не учитывают вопроса об адаптации (и обычно нигде не указывается времени действия тех тонов, громкость которых изучается), ввиду чего оценка данных этих работ с точки зрения теории Лазарева очевидно затруднительна. Здесь требуется ряд дополнительных исследований.

Глава IV

ВОСПРИЯТИЕ СОЗВУЧИЙ. КОМБИНАЦИОННЫЕ ТОНЫ. ДИССОНАНС И КОНСОНАНС

Давно известно, что при одновременном звучании двух или нескольких тонов слуховое восприятие оказывается совершенно различным по характеру, в зависимости от отношения чисел колебаний составляющих тонов. Я не буду здесь останавливаться на общих вопросах о консонансе, диссонансе, музыкальной гармонии и построении гамм. Эти вопросы уже не новы и достаточно полно освещены в многочисленных монографиях и руководствах. Коснусь подробнее лишь вопроса о возникновении комбинационных тонов.

Несомненно, что для слуха созвучие нескольких тонов не является просто суперпозицией (наложением) ощущений отдельных тонов. Уже поверхностное наблюдение показывает, что каждое созвучие или аккорд представляют из себя более сложное сочетание, чем простая сумма тонов. При созвучании двух сильных тонов обычно ясно слышится некоторый низкий призывок или разностный тон (это открытие сделано еще в XVIII веке скрипачом Тартини), число колебаний которого равно разности чисел колебаний первичных тонов, а также еще и другие

призвуки, лежащие ниже, чем два созвучающих тона; все они могут быть названы „унтертонами“.

Гельмгольц показал, что на некоторых инструментах (например, на органе и на двойной сирене) получаются еще и верхние призвуки (суммовые тоны), которых нет в первоначальных звуках; суммовые тоны довольно слабы и не играют такой роли, как разностные. Все эти добавочные призвуки возникают лишь субъективно и носят название комбинационных тонов. В некоторых случаях образование разностных и суммовых тонов получается и объективно, в самом источнике звука; так, например, происходит дело в органе или фисгармонии. Но сейчас мы интересуемся только субъективными комбинационными тонами.

Гельмгольц показал теоретически ¹, что возникновение комбинационных тонов возможно в том случае, если какая-нибудь часть слухового аппарата обладает несимметричной упругостью, т. е. легче поддается в одну, чем в другую сторону; таким свойством, как мы уже имели случай указать, как раз обладает барабанная перепонка.

По теории Гельмгольца, сила комбинационных тонов пропорциональна квадрату силы первичных тонов, или их произведению, и потому они особенно заметны при сильных первичных тонах. Если n_1 и n_2 — числа колебаний первичных тонов, то комбинационные тоны первого порядка будут иметь числа колебаний:

$$2n_1, 2n_2, n_1 - n_2, n_1 + n_2,$$

комбинационные тоны второго порядка будут иметь числа колебаний:

$$3n_1, 3n_2, 2n_1 + n_2, 2n_2 + n_1, 2n_1 - n_2, 2n_2 - n_1;$$

¹ Н. Helmholtz. Die Lehre von den Tonempfindungen, S. 650.

таким же образом получаются и комбинационные тоны высших порядков.

Наиболее сильно выделяются низкие комбинационные тоны; теория показывает, что разностный тон первого порядка ($n_1 - n_2$) должен обладать большой силой, что подтверждает и опыт.

Если отношение чисел колебаний первичных тонов выразить несократимой дробью $\frac{N_1}{N_2}$, то легко видеть, что комбинационные тоны будут иметь относительные числа колебаний, выражающиеся рядом натуральных чисел: 1, 2, 3, 4 и т. д., в этот ряд войдут и первичные тоны, выражаемые числами n_1 и n_2 , и разностный тон, и все суммовые тоны. Так, например, если звучат тоны в 1200 и 700 кол./сек., то отношение их чисел колебаний (интервал) можно выразить несократимой дробью 12:7; комбинационные тоны будут:

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 и т. д.

В этом ряде разностный тон $12 - 7 = 5$ будет иметь 500 кол./сек. Комбинационный тон 1 обычно бывает очень ясно слышен. Если звучат два тона, относительное число колебаний которых выражается числами, разняющимися на единицу, то комбинационный тон 1 будет в то же время и разностным тоном; он будет иметь увеличенную громкость. Так как гармонические обертоны всякого звука выражаются рядом целых чисел, то ясно, что каждая пара соседних обертонов будет давать комбинационный тон 1, то есть будет повторять основной тон. Следовательно, комбинационные тоны соседних гармонических обертонов усиливают основной тон. Будут усилены, но в меньшей степени, путем ком-

бинирования несоседних обертонов как октава, так и следующие обертоны. Эти соображения объясняют многие факты, известные из телефонной практики, о чем мы будем еще иметь случай упомянуть позднее.

В случае простых интервалов, многообразие комбинационных тонов сильно упрощается. Так, интервал квинты, $3:2$, дает только один низкий комбинационный тон 1, обладающий всегда значительной силой. Кварта, $4:3$, дает сильный тон 1 и более слабый 2.

В случае интервалов, выражающихся отношением больших целых чисел, картина комбинационных тонов так многообразна и сложна, что даже опытное музыкальное ухо не может в ней разобраться. Вегель и Лэн¹ в 1924 г. предложили прекрасный способ обнаружения и измерения силы комбинационных тонов, основанный на явлении биений. Если к созвучию двух тонов, дающему комбинационные тоны, примешать третий звук небольшой силы, который можно плавно изменять по высоте и по интенсивности (напр. звук телефона, питаемого от катодного генератора), то при неполном совпадении этого звука с каким-либо из комбинационных тонов мы услышим биения, которые будут наиболее отчетливы при равенстве интенсивностей этих двух тонов. Таким образом, перестраивая третий вспомогательный звук-зонд по всей шкале высот, можно обнаружить и измерить силу всех комбинационных тонов. Авторы исследовали таким образом созвучие 1 200 и 700 кол./сек., даваемое двумя катодными генераторами, т. е. интервал $12:7$ (несколько меньший малой септимы), и нашли следующие комбинационные тоны:

¹ Wegel and Lane. Phys. Rev., 23, p. 266, 1924.

1 900 ($n_1 + n_2$), 500 ($n_1 - n_2$), 2 400 ($2 n_1$), 1 400 ($2 n_2$),
 3 600 ($3 n_1$), 2 100 ($3 n_2$), 3 100 ($2 n_1 + n_2$), 1 700 ($2 n_1 - n_2$),
 2 600 ($2 n_1 + n_2$), 200 ($2 n_1 - n_2$), 2 400 ($4 n_1$),
 3 800 ($2 n_1 + 2 n_2$), 1 000 ($2 n_1 - 2 n_2$), 4 300 ($3 n_1 + n_2$),
 2 900 ($3 n_1 - n_2$), 3 300 ($3 n_2 + n_1$), 900 ($3 n_2 - n_1$).

Исследуя вопрос о консонансе и диссонансе чистых тонов, пользуясь звуком катодных генераторов, я обнаружил ¹, что явление консонанса и благозвучия аккорда гораздо тесней связано с наличием комбинационных тонов, чем это можно было думать. Так, например, созвучие квинты дает настолько сильный разностный тон, что превращается в сущности в единый звук с гармоническими обертонами 1, 2, 3 и т. д., который при известных условиях почти не может быть разложен ухом на составные части. Если два тона поступают раздельно к правому и левому уху, то, как мне удалось показать, суждение о консонансе или диссонансе становится неуверенным, настройка интервалов удается лишь лицам с музыкальным опытом (по памяти) — что является, очевидно, следствием невозможности возникновения комбинационных тонов при раздельном слушании.

Исследуя, тем же методом, созвучия и комбинационные тоны, Орлов ² нашел, что комбинационные тоны являются основным фактором, определяющим гармонию созвучия. Кроме того, Орлов обнаружил при интервалах, больших, чем октава, существование разностных тонов, лежащих внутри интервала.

Вегель и Лэн исследовали созвучие двух тонов по вышеописанному методу зонда и нашли ряд совершенно

¹ С. Ржевкин. Изв. Физ. И-та при МНИ, I, вып. II, 1920.

² И. Орлов. Труды Гос. Инст. Муз. Наук. Акустич. сборник, вып. I, стр. 31, 1925.

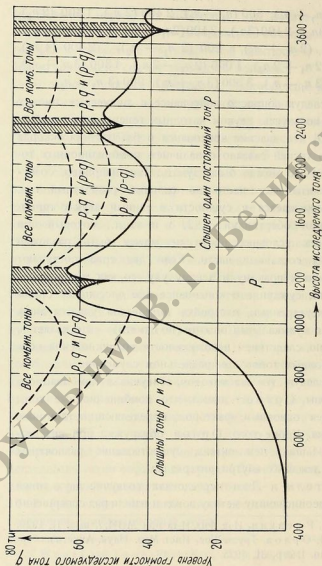


Рис. 12. Созвучие двух тонов: постоянного по высоте и силе тона p (1200 кол./сек. и 80 TU) и второго тона q , изменяемого по высоте и силе в широких пределах. Заштрихованы области, где слышны бисния.

новых фактов. Условия опыта были таковы: брался один тон определенной высоты (p) и силы,—второй же тон другой высоты (q) изменялся постепенно по силе и звуковая масса исследовалась при помощи вспомогательного источника (звукового зонда). Пока тон q был слаб, он совсем не был слышен на фоне тона p ; затем (если тон q ниже, чем p), на фоне тона p появляется тон q , и при значительном усилении слышны оба тона сразу (p и q); при дальнейшем усилении q появляется разностный тон ($p - q$), и, наконец, все комбинационные тоны разных порядков. В области между p и $2p$ разностный тон ($p - q$) появляется раньше, чем становится слышимым второй тон (q). В области между $2p$ и $3p$ тоны q и ($p - q$) появляются сразу. Вышеизложенное пояснено графически на рис. 12. Заштрихованные полосы показывают области возникновения биений.

В настоящее время музыкальные теоретики начинают подходить к вопросам гармонии прежде всего с точки зрения комбинационных тонов. Гарбузов¹ показал, например, что понятие о мажоре и миноре вовсе не является чем-то неизменным, присущим определенным интервалам и созвучиям. Минор в чистой форме может существовать только в области низких тонов, где комбинационные тоны не слышны, в области же высоких тонов минорные созвучия неизбежно приобретают характер мажора, благодаря призвуку нижних комбинационных тонов. Это обстоятельство композиторы, конечно, чувствовали бессознательно и ранее, так как большинство произведений, выражающих скорбь, написано в низких тонах.

¹ Н. Гарбузов. Труды Гос. Инст. Муз. Наук. Акустич. Сборн. I, стр. 7, 1925.

Влияние комбинационных тонов на характер созвучия в случае более чем двух тонов в аккорде было до последнего времени очень мало изучено. Флетчер¹ в лаборатории Вестерн Электрик К^о выяснил, что комбинационные тоны здесь играют еще гораздо более существенную роль, чем в случае двух тонов. Изучая искажения, получающиеся при разных условиях при передаче по телефону речи, Флетчер обнаружил совершенно неожиданный факт, что исключение из состава звука основного тона и первых обертонов не создает почти никаких изменений тембра и характера гласных, несмотря на то, что, как мы увидим далее, главная часть звуковой энергии речи лежит как раз в области основного тона и первых обертонов. Это исключение отдельных гармоник производилось посредством электрических фильтров, которые позволяют пропустить через телефонную линию любую область звуковых частот и задержать остальные.

Далее Флетчер показал, что значительные искажения получаются лишь при исключении высоких обертонов, начиная с 1 000 кол./сек. (C^3) и выше. Исследуя вопрос детально, он нашел, что характер гласных не меняется благодаря субъективному восполнению исключаемых тонов за счет образования низких комбинационных тонов. Действительно в звуке всех гласных имеется всегда область сильных высоких обертонов, гармонических с основным тоном; например, в звуке гласной „а“ обычно усилены гармоники в области от 600 до 1 100 кол./сек. (см. гл. IX), и, как указывалось выше, каждая пара таких соседних гармоник дает комбинационный

¹ H. Fletcher. Phys. Rev., 23, p. 427, 1924.

тон, равный по высоте или основному, или одному из низких обертонов, в результате чего получается большее усиление низких гармоник. Из этих соображений ясно, почему исключение только низких тонов не изменяет тембра; причина в том, что исключенные из состава звука низкие тона возникают вновь субъективно с громкостью, лишь немного меньшею, чем в первоначальном звуке. Другое дело, когда исключаются высокие гармоники, характеризующие данную гласную (форманта), которые не могут быть восполнены за счет комбинационных тонов; тогда тембр звуков сразу резко и до неузнаваемости меняется, и речь становится совершенно непонятной. Примерно также обстоит дело и с передачей звуков музыкальных инструментов в низком регистре.

Флетчер показал, кроме того, на особом опыте, что составляя комбинацию трех и более независимых тонов, числа колебаний которых относятся как ряд натуральных чисел, мы всегда получаем образование исключительно мощных комбинационных тонов с относительными числами колебаний 1, 2, 3 и т. д., из коих самый низкий тон 1 наиболее силен. В результате сочетания тонов 700, 800, 900 и 1000 кол./сек. получается, например, очень сильный общий разностный тон 100 кол./сек., а также тоны 200, 300 и т. д. и созвучие четырех тонов приобретает характер единого звука с красивой тембральной окраской и с высотой 100 кол./сек. Прибавка объективного тона 100 кол./сек., равного по силе высоким тонам, в тембре звука ничего не меняет. Это образование комбинационных „унтертонов“ получается исключительно сильно при созвучии более чем двух тонов, что обнаружено Флетчером впервые.

Одиночный звук сложного тембра с гармоническими обертонами не дает никаких комбинационных тонов, лежащих ниже основного. Возникновение „унтертонов“, то есть тонов, имеющих в 2, 3, 4 и т. д. раз меньшее число колебаний, чем возбуждающий звук, на опыте не наблюдается, и построения некоторых музыкальных теоретиков (Риман), основанные на этой базе, являются чисто отвлеченными. С точки зрения резонансной теории слуха появление „унтертонов“ соответствовало бы возбуждению оберточных колебаний в волокнах основной мембраны, настроенных на тоны в 2, 3 и т. д. раза ниже основного, причем волокна мембраны должны были бы разбиваться при этих колебаниях на 2, 3 и более частей, подобно струне, возбужденной обертонами ее основного тона. Это является вряд ли возможным ввиду того, что волокна слуховой мембраны имеют довольно массивную структуру и вряд ли способны совершать такие резкие перегибы при колебаниях. Таким образом, с точки зрения резонансной теории слуха, возникновение унтертонов необъяснимо.

Теория комбинационных тонов позволяет предвидеть один очень важный пункт, мало оттененный самим Гельмгольцем, — это возможность возникновения субъективных обертонов в том случае, когда на ухо воздействует один только простой синусоидальный тон. В симметричной мембране можно считать упругую силу пропорциональной величине отклонения из положения равновесия (закон Гука). В несимметричной мембране упругая сила не одинакова при положительных и отрицательных отклонениях равной величины. При этих условиях синусоидальное воздушное

колебание с частотою n вызывает в мембране основное колебание частоты n с рядом обертонов: $2n$, $3n$, $4n$ и т. д. Наличие этих обертонов очень трудно различить ухом, так как они сливаются в ощущение единого звука.

При помощи изложенного выше метода биений субъективные обертоны легко обнаруживаются. Действительно, если на фоне звучания одного сильного тона, чисто синусоидального (что легко проконтролировать записью кривой), заставить звучать другой синусоидальный тон переменной высоты, то всегда обнаружатся ясные биения, когда переменный тон (зонд) в 2, 3, 4 и т. д. раза выше изучаемого. Изменяя силу переменного тона, можно добиться наиболее резких биений; при этом сила переменного тона будет равна силе субъективного обертона. Измерения ¹ показывают, что субъективные обертоны на уровне в 80 TU уже могут достигать силы основного тона и даже (при низких тонах) быть сильнее его. Субъективные обертоны резко усиливаются с усилением первичного тона, как того и следовало ожидать теоретически. При уровнях громкости ниже 40 TU (в 10000 раз выше порога) субъективные обертоны уже не возникают. Таким образом ощущение чистого тона возможно лишь при малых громкостях; сильные тоны неизбежно приобретают тембуральную окраску, и тем большую, чем они сильнее.

Чрезвычайно интересны результаты опытов Вегеля и Лэна по вопросу о заглушении или маскировании одного тона другим. Если считать порог

¹ Wegel and Lane. Phys. Rev., 27, p. 266, 1924.

слышимости тонов разных высот известным, то является вопрос — изменится ли этот порог при одновременном

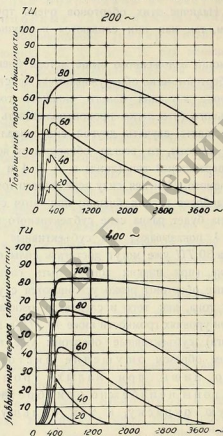


Рис. 13а. Маскировка тонов различных высот тонами 200 и 400 кол./сек., различной громкости (20, 40, 60, 80 и 100 TU выше порога слышимости).

звучании какого-нибудь тона другой высоты? Опыт показывает, что в этом случае порог всегда возрастает.

Величину маскирующего действия удобно измерять поэтому приростом или сдвигом кверху порога восприятия тона в присутствии второго маскирующего тона, по сравнению с его порогом в тишине; таким образом величина маскировки будет измеряться в единицах TU .

Величина маскирующего действия тем больше, чем ближе лежат друг к другу по высоте маскирующий и маскируемый тон (правда, при небольшой разнице в частоте получаются биения, которые облегчают восприятия одного тона на фоне другого, ввиду чего маскирующее действие уменьшается). Если изобразить маскирующее действие графически, отложив по абсциссам высоту маскируемого тона, а по ординатам увеличение порога восприятия звука на фоне маскирующего тона (в единицах TU), то, при слабых звуках, мы получим нечто вроде резонансной кривой со впадиной на вершине (см. нижние кривые всех графиков на рис. 13); впадина является следствием возникновения биений, которые облегчают обнаружение маскируемого тона.

При увеличении силы звука маскирующего тона выступает совершенно иное явление: тоны, лежащие ниже маскирующего, заглушаются сравнительно очень мало; тоны, лежащие выше маскирующего, заглушаются, наоборот, очень сильно, даже и при большом различии высот обоих звуков. Маскирующее действие особенно сильно в области, близкой к обертонам маскирующего звука, что хорошо видно из кривых рис. 13 для больших громкостей при частотах маскирующего тона 800 и 1 200 кол./сек. Это наблюдение естественно поставить в связь с возникновением субъективных обертонов. Каждый из графиков рис. 13 показывает маскирующее действие одного из тонов:

200, 400, 800, 1 200, 2 400, 3 500 кол./сек. при различных уровнях громкости (20, 40, 60, 80, 100 TU) на тоны музыкальной шкалы от самых низких до 4 000 кол./сек.

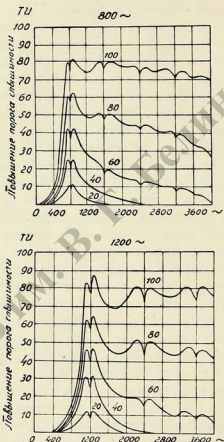


Рис. 13б. Маскировка тонов различных высот тонами 800 и 1 200 кол./сек., различной громкости (20, 40, 60, 80 и 100 TU выше порога слышимости).

Мы видим из этих кривых, что громкий тон данной высоты маскирует чрезвычайно

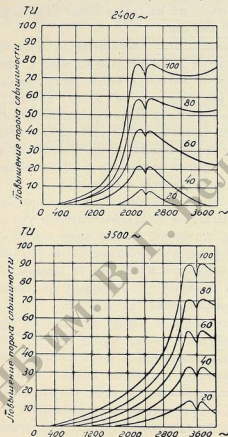


Рис. 13с. Маскировка тонов различных высот тонами 2 400 и 3 500 кол./сек., различной громкости (20, 40, 60, 80 и 100 TU выше порога слышимости).

сильно все более высокие тоны и в гораздо меньшей степени тоны более низкие. Тон

в 200 кол./сек. маскирует почти всю музыкальную шкалу, а тон 3 500 кол./сек. хотя и маскирует выше лежащие звуки, но почти не влияет на порог слышимости тонов ниже 1 000 кол./сек.

Правильность этих заключений легко проверить при слушании оркестра: мелодия на низких тонах всегда ясно выделяется из общей массы звуков, особенно хорошо выделяются низкие звуки органа (органный пункт), и, наоборот, высокие инструменты должны дать очень большую силу звука, чтобы их было слышно на фоне низких тонов. В больших оркестрах на десятки скрипок приходится 5—6 контрабасов, и тем не менее их всегда ясно слышно.

Уменьшение маскирующего действия при воздействии маскирующего тона на противоположное ухо позволило определить, что звук, проходя через голову к другому уху, ослабляется по интенсивности на 40—50 *TU*, то есть от 10 000 до 100 000 раз (в зависимости от высоты), что совпадает с измерениями, сделанными на лицах, совершенно глухих на одно ухо.

Мы видели, что в случае многозвучий происходит, при большой силе звука, весьма сильное образование субъективных обертонов и комбинационных тонов. Это влечет, конечно, искажение тембра. При громадном увеличении интенсивности речи, как это имеет место в современных громкоговорителях, неизбежно должно получиться искажение тембра гласных и согласных, влекущее за собой неразборчивость речи, что и наблюдается при усилении громкости более чем до 80 *TU*. Поэтому, например, испытание мощных громкоговорителей в маленькой комнате совершенно не имеет смысла: они обязательно дадут непонятную речь, тогда как на от-

крытом воздухе эти громкоговорители будут прекрасно работать. Те же рассуждения приходится применять и к усилительным аппаратам, предназначенным в помощь глухим. Сильные звуки, даваемые этими аппаратами, неизбежно дадут в ухе искажения тембра, что ухудшает разборчивость речи. Вот почему исправление сильной глухоты, хотя, казалось бы, и возможно технически, так как современные усилители дают почти неограниченное усиление, практически не приводит к желаемым результатам, если глухота превосходит известную границу; это обусловлено особенностями механизма нашего уха.

Глава V

РЕЗОНАНСНАЯ ТЕОРИЯ СЛУХА. ЕЕ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, КРИТИКА И ЗАТРУДНЕНИЯ

Основные соображения, приведшие к установлению резонансной теории слуха, и многочисленные факты, ею объясняемые, были уже нами частично рассмотрены в предыдущих главах. Будет нелишним закончить наш обзор явлений слухового восприятия сопоставлением всех известных феноменов, которые объяснимы с точки зрения резонансной теории, с одной стороны, и всех приведенных против нее возражений — с другой.

Резонансная теория слуха прежде всего просто и естественно объясняет основные факты слухового восприятия: способность различать тоны разной высоты, улавливать различия в тембре и производить анализ (разложение) сложных звуков на основные простые тоны (закон Г. Ома). Независимость ощущения тембра звука от фаз составляющих тонов, бесспорно доказанная рядом опытов (Германа, Линдинга¹, Лазарева², Хартриджа³), является также совершенно очевидной

¹ F. Linding, Ann. d. Phys., 10, 242, 1903.

² Лазарев. ZS. für Sinnesphysiol., 45, S. 51, 1911.

³ C. Cosens and H. Hartridge, Nature, 109, p. 11, 1922.

с точки зрения резонансной теории и служит одним из сильнейших аргументов в ее пользу.

Явление биений объясняется интерференцией колебаний, слегка различных по высоте, которая происходит в промежуточной области основной мембраны, затронутой колебаниями как того, так и другого периода. Это объяснение предполагает, что тон данной высоты затрагивает ряд волокон мембраны, причем колебания становятся слабей по мере удаления от резонансной области, колеблющейся всего интенсивней. Степень ослабления колебаний по мере удаления от максимума обусловлена, очевидно, затуханием волокон мембраны. Эту важную величину, определяющую остроту резонанса, то есть тонкость музыкального восприятия, Гельмгольц измерил, наблюдая, при какой быстроте трелей ухо перестает слышать переходы с одного тона на другой и начинает слышать общий слитный звук; он нашел, что слитие трелей начинается при частоте более 10 раз в секунду (по 5 раз каждый тон). Из этих наблюдений Гельмгольц вычисляет, что декремент затухания резонаторных элементов в ухе будет равен на всех высотах около 0,1, то есть через 10 полных колебаний получается ослабление амплитуды до $\frac{1}{10}$ части начальной величины. Затухание резонаторов можно определить также из явления биений, из наблюдений величины интервала, при которой два близких, но различных, тона ощущаются отдельно, из явления маскирования тонов и ряда других явлений.

Из всех позднейших многочисленных наблюдений выяснилось, что затухание более высоких резонаторов, повидимому, несколько меньше, чем низких. Вегель и Лэн в цитированной выше работе о маскировании тонов

дают в графической форме резонансные кривые и картину распределения отдельных тонов при восприятии их основной мембраной (рис. 14). По абсциссам здесь отложены расстояния от корня улитки по длине мембраны, а по ординатам амплитуды колебаний мембраны под действием тона одной и той же интенсивности, но разных высот. Эти кривые — не что иное, как кривые маскировки, вычерченные по ординатам в линейном масштабе, а не в логарифмическом, как это сделано на рис. 13. Из чертежа ясно,

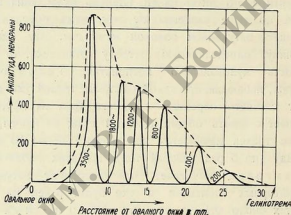


Рис. 14. Амплитуда основной мембраны при воздействии тонов одинаковой интенсивности на разных высотах.

что острота резонанса для высоких тонов значительно больше, чем для низких. Максимум чувствительности получается на 3 500 кол./сек., что несколько отличается от принтого до сих пор максимума в 2 300 кол./сек. (на квинту выше); эта разница, однако, не существенна, так как чувствительность меняется в этой области, вообще говоря, очень мало (см. рис. 6). Авторы разбирают, между прочим, две интересных гипотезы, а именно, что звукам

одинаковой субъективной громкости соответствуют или одинаковые амплитуды колебаний основной мембраны, или одинаковые скорости движения ее при всех высотах; эти две возможности, очевидно, не равноценны.

Мы не останавливаемся на общеизвестном объяснении явления биений, которое послужило для Гельмгольца базой к объяснению явлений диссонанса и консонанса, и в дальнейшем позволило ему дать объяснение всей совокупности фактов музыкальной гармонии и заложить, таким образом, фундамент рационального построения всей теории музыки.

Резонансная теория легко объясняет ряд фактов, связанных с болезненным состоянием слуха. Известное еще со времен Бецольца существование провалов слуха на некоторых высотах и наличие „островков“ слуха у глухонемых вполне понятны, если допустить частичное уничтожение слуховых функций основной мембраны благодаря болезненным процессам или в силу врожденных структурных дефектов.

С точки зрения резонансной теории легко объяснимо также явление раздвоенного слуха или „diplosis“, заключающееся в том, что правое и левое ухо воспринимают один и тот же звук, как два разных по высоте звука. При раздвоенном слухе разница в восприятии обычно бывает не велика, но может доходить до нескольких тонов и даже до целой октавы; это явление иногда наблюдается по всему диапазону высот, иногда же бывает ограничено узкой областью. Ощущение тона определенной высоты объясняется резонансом колебаний в определенной области слуховой мембраны и раздражением нервов, связанных с этой областью. Если упругие свойства мембраны или масса

ее изменились вследствие тех или иных болезненных процессов или врожденных деформаций всей улитки, то резонанс колебаний для тона данной высоты будет получаться уже не на том месте мембраны, как это должно быть у нормального уха; это повлечет за собой возбуждение нервов, соответствующих другой высоте тона, и вызовет в поврежденном ухе „diplocusis“. По миновании болезненных процессов „diplocusis“ может исчезнуть. Объяснение этого явления служит одним из очень убедительных аргументов в пользу резонансной теории.

Несомненно, что если бы рост организма был связан с изменением размеров улитки, то это вызвало бы изменение в резонансных свойствах слуховой мембраны, то есть сильное изменение восприятия высоты с возрастом. Однако этого не наблюдается, и анатомические данные ¹ согласно этому говорят, что размеры лабиринта почти одинаковы у новорожденного и у взрослого человека.

Объяснение громадной разницы чувствительности слуха в области тонов разной высоты (при 2 300 кол./сек. ухо в миллион раз чувствительней, чем при 50 кол./сек.), а также объяснение диапазона слуховых восприятий в 10 октав, с точки зрения резонансной теории слуха довольно затруднительно, на что указал еще М. Вин (см. гл. II). Он подсчитывает, что при низких тонах (50 кол./сек.), настолько слабых, что они еще не слышны, будут, хотя и в слабой степени, приведены в колебания волокна слуховой мембраны, соответствующие высоким тонам, причем благодаря большой чувствительности уха в области около 2 000 кол./сек. ощущение

¹ Handb. der Hals, Nasen- und Ohrenheilk, von Denker u. Kehler. Bd. VI, S. 472.

высоких тонов должно бы возникнуть раньше, чем низкий звук превзойдет порог слышимости. Но в действительности этого не наблюдается. Против этого рассуждения Вина можно сделать ряд возражений. Несомненно, например, что одинаковые по силе звуки разных высот будут с неодинаковой силой перенесены в жидкость лабиринта. Опыты Минтона¹ показывают, что, чем ниже тон, тем слабее он передается во внутреннее ухо. Вероятно также, что волокна основной мембраны на высоких тонах имеют гораздо более острый резонанс и потому очень слабо возбуждаются низкими тонами. Фишер² приводит еще одно возражение: чтобы вызвать раздражение слуховых нервов, необходимо наличие относительного движения основной и кортиева мембраны. При действии низкого звука обе мембраны в той области улитки, где воспринимаются высокие тоны, придут в одинаковые по амплитуде и фазе колебания, а следовательно не будет относительного их движения и раздражение нервных клеток не возникнет, хотя амплитуда колебаний основной мембраны и достигает, может быть, значительной величины. В области же низкого тона, где волокна основной мембраны настроены на соответствующую частоту, основная мембрана придет в более сильные колебания, чем кортиева, и создастся относительное их движение, что приведет к раздражению слуховых клеток и вызовет ощущение звука низкого тона.

Аналогичное возражение против резонансной теории слуха делает Минтон³ на основании наблюдаемых в

¹ J. Minton, Proc. Nat. Acad. of Sc., 11, p. 439, 1925, № 7.

² O. Fischer, Ann. d. Phys., 25, p. 118, 1908.

³ J. Minton, Proc. Nat. Acad. Amer., 7, p. 221, 1921; 8, p. 274, 1922.

аудиограммах слуха резких провалов в узкой области частот (см. рис. 7 и 8). Казалось бы, что тон, соответствующий резкому провалу слуха, должен при известном усилении привести в колебание соседние области основной мембраны и вызвать ощущение тонов выше и ниже действительно звучащего, чего в действительности не наблюдается. Кроме того, что уже было сказано по поводу соображений Вина, надо еще добавить, что наблюдения Минтона необходимо продолжить на звуках, более сильных, чем звуки, лежащие на пороге слышимости, что им сделано не было, и потому мы еще не имеем здесь решительных данных против резонансной теории.

Для объяснения большого диапазона слухового восприятия и разницы в чувствительности уха Роаф¹ и затем Флетчер² развили новую теорию, дополняющую и отчасти видоизменяющую теорию Гельмгольца. Роаф и Флетчер отказываются от приписывания резонансных свойств отдельным волокнам слуховой мембраны и считают, что при воздействии на нее звука она приходит в колебание по всей своей длине, но с некоторым максимумом амплитуды, приходящимся на определенный ее участок. Положение места наибольшей амплитуды зависит, главным образом, не от свойств самой мембраны, а от длины всего приходящего в движение столба жидкости, считая эту длину от овального окна через вестибулярный ход, через место наибольшей амплитуды мембраны и, обратно, через барабанный ход к круглому окну (см. рис. 4 а). Масса жидкости улитки представляет, в силу своей инерции, тем большее сопротивление

¹ H. Roaf, Phil. Mag., 43, p. 349, 1922.

² H. Fletcher, Journ. Frankl. Inst., 196, p. 289, 1923.

прохождению колебаний, чем выше тон. Поэтому высокие тоны замыкаются через основную мембрану вблизи от основания, низкие же тоны — ближе к геликотреме, как это и принято на основании анатомических данных. Таким образом высокие тоны приводят в движение лишь небольшую массу жидкости вблизи основания улитки, что обуславливает увеличение чувствительности уха. Для тонов выше 15 000 кол./сек. инерция небольшого остаточного столба жидкости, который лежит на пути в случае замыкания колебаний через самые крайние части мембраны, становится чрезмерно велика (она растет пропорционально квадрату частоты), и этим обуславливается верхний предел слуха.

Флетчер принимает, что в мозговых центрах ощущение высоты тона получается соответственно только тому месту слуховой мембраны, где возникает максимальная амплитуда колебаний, независимо от того, какова амплитуда в других точках, и таким образом обходит возражения Вина.

Таким образом Роаф и Флетчер переносят резонансные свойства с основной мембраны на всю совокупность элементов улитки. Флетчер дает очень интересную электрическую аналогию улитки (рис. 15). На этом рисунке C_1 и C'_1 представляют из себя емкости, аналогичные упругостям овального и круглого окна; $L_1, L_2, L_3 \dots L_N$ — самоиндукции, аналогичные массе жидкости вестибулярного хода; $L'_1, L'_2, L'_3 \dots L'_N$ — аналогичны массе жидкости барабанного хода; L_H — соответствует массе жидкости геликотремы; $l_1, l_2, l_3 \dots l_N$ и $C_1, C_2, C_3 \dots C_N$ — самоиндукции и емкости, аналогичные массам и упругостям в различных точках основной мембраны; $A_1, A_2, A_3 \dots$ — амперметры, отмечающие силу

тока (силу колебаний). При наложении переменного напряжения E известной частоты, наиболее сильный ток пойдет в той цепи, условия резонанса которой совпадают с приложенной частотой, причем в создании наиболее сильного тока в той или иной ветви будут играть роль не только собственные периоды отдельных элементов (l_N, c_N) основной мембраны, но и емкости и самоиндукции, лежащие на пути к данному элементу (упругость овального и круглого окна и масса жидкости

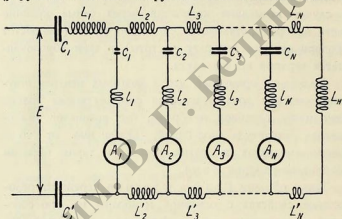


Рис. 15. Электрическая аналогия строения слухового аппарата. улитки). В результате самые низкие частоты замкнутся через амперметр A_N (вершина улитки), самые высокие — через амперметр A_1 (основание улитки).

Гипотеза Роафа - Флетчера объясняет как большой диапазон слухового восприятия, так и разницу в чувствительности уха при разных частотах.

Лазарев¹ в развитой им ионной теории слуха для объяснения большой разницы чувствительности

¹ П. Лазарев. Ионная теория возбуждения. Москва, 1916.

слуха при низких и высоких тонах допускает существование в слуховых нервах особого звукочувствительного вещества, разложение которого идет гораздо быстрее при высоких частотах.

Главные трудности стоят, однако, перед резонансной теорией в связи с объяснением всей совокупности слухового восприятия по силе и высоте в связи с законом специфических нервных энергий (закон: „все или ничего“). Количество разветвлений слухового нерва далеко не так велико, как разнообразие тонов, воспринимаемых ухом (около 300 000). Для объяснения большого числа градаций в изменении громкости и высоты (см. главу V) необходимо принять существование настолько большого числа нервных окончаний, каковое трудно допустимо с анатомической точки зрения. Этот вопрос стоит сейчас перед теорией слуха не разрешенным и ждет объяснения.

Я не буду здесь касаться большого числа теорий слуха, основанных на нерезонансном принципе (теории Эвальда, Боннье, Тер Кюиле, М. Мейера), так как они не объясняют и небольшой доли всех фактов слухового восприятия и потому должны быть признаны несостоятельными.

Глава VI

БИНАУРАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ. ТЕОРИИ, ОБЪЯСНЯЮЩИЕ ВОСПРИЯТИЕ НАПРАВЛЕНИЯ СЛУХОМ. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

Человек и все животные способны различать, с какой стороны приходит воспринимаемый ими звук; люди оценивают направление звуковой волны довольно точно, так, что разница в 3—4° является уже вполне ощутимой. Большие животные, например слоны, определяют направление, повидимому, еще точнее. Эта важная способность органа слуха обусловлена, без сомнения, наличием двух ушей, так как люди, глухие на одно ухо, почти не могут определить направление звука (если они не вращают головой). Поэтому мы можем назвать вышеописанное явление бинауральным (т. е. двуушным) эффектом. На высоких тонах (3-я октава, выше 1000 кол./сек.) суждение о направлении становится неуверенным, и часто наблюдается разница между действительным и кажущимся положением источника звука.

Исследования последних лет весьма подробно осветили вопрос о бинауральном эффекте, как с теоретической, так и с опытной стороны. Для объяснения способности определять направления возможны три предположения:

1. Суждение о направлении составляется благодаря тому, что ухо, повернутое к источнику звука, получает более интенсивный звук, чем противоположное ухо. Если звуки, воспринимаемые обоими ушами, одинаково громки, то звук локализуется нами в средней плоскости, т. е. кажется идущим спереди (или сзади).

2. Суждение о направлении создается благодаря способности воспринимать разность фаз, образующуюся благодаря приходу звука раньше к одному уху, чем к другому.

3. Суждение о направлении составляется благодаря способности воспринимать и учитывать промежуток времени между приходом одинаковых фаз звука к одному и другому уху (теория Хорнбостеля-Вертхеймера и Стюарта). Здесь уместно вспомнить, что если разность времен составляет t сек., то разность фаз будет $2\pi t$; так, например, для тона 100 кол./сек., при промежутке времени в $\frac{1}{400}$ секунды, мы получим разность фаз, равную $\pi/2$ ($\frac{1}{4}$ периода); для тона же в 400 кол./сек. это будет соответствовать разности фаз 2π , т. е. целому периоду.

Теория дифракции звука вокруг шара, развитая лордом Релеем¹, показала, что различие интенсивностей звука спереди и сзади шара, размером с голову человека, вообще говоря, незначительно и, кроме того, оно быстро убывает с увеличением длины звуковой волны. Эта причина могла бы объяснить способность восприятия направления лишь при высоких частотах. Так, например, при высоте тона в 128 кол./сек. разница

¹ Lord Rayleigh, Phil. Mag., 13, p. 217, 1907, а также „Theory of Sound“, § 328.

интенсивностей спереди и сзади шара составила бы всего 1⁰/₀, что уже не ощущается ухом как разница громкости. Однако при этой высоте тона бинауральный эффект, как показывает опыт, весьма силен.

Стюарт¹ показал на опыте, что способность определять направление по разности интенсивностей понижается по мере повышения звука, т. е. мы имеем эффект, обратный требованиям теории, откуда он заключает, что разница интенсивностей не является существенным фактором при суждении о направлении звука. Таким образом первая гипотеза не оправдывается.

Если справедливо второе предположение, то при одной и той же разности фаз двух тонов должно получиться одинаковое суждение о направлении независимо от высоты тона. Предположим, что под одним и тем же углом приходят два звука — в 100 и 400 кол./сек. Так как расстояние между ушами по линии распространения волны для обоих звуков одинаково, то и промежуток времени Δt между моментами достижения звуками двух ушей будет одинаков. Разность же фаз, равная $2\pi\Delta t$, будет, очевидно, для тона в 400 кол./сек. в 4 раза больше, чем для тона в 100 кол./сек. Из этих соображений ясно, что при правильности второй гипотезы острота определения направления должна бы увеличиваться с частотой. Опыт показывает, однако, что острота определения направления одинакова при разных частотах и равна, примерно, 3—4°. Таким образом вторая гипотеза не оправдывается на опыте и наиболее вероятным становится третье предположение.

¹ G. Stewart, Phys. Rev., 15, p. 425, 1920; 9, p. 52 1917 (обзор вопроса).

Значительную ясность внесли в этот вопрос опыты Стюарта. Обстановка опытов в принципе такова: к двум ушам подводятся два независимые звука одной силы, разность фаз коих может быть точно измерена, и определяется, в каком направлении локализуется „кажущийся“ источник звука в зависимости от разности фаз.

При отсутствии разности фаз звук всегда кажется идущим как раз спереди. При наличии разности фаз, звуковое „изображение“ перемещается в сторону звука, опережающего по фазе. При разности фаз, близкой к 180° , смещение изображения наибольшее — на низких тонах (100 кол./сек.) оно около 180° , при 1 000 кол./сек. оно падает до 40° . Таким образом положение „кажущегося источника звука“, при данной разности фаз, зависит от высоты звука. При увеличении разности фаз до 180° звуковое изображение быстро приближается к наблюдателю, как бы входит в голову, перескакивает на другую сторону при переходе фазы через 180° , и затем совершает симметричный путь по другую сторону до средней плоскости; при разности фаз $(-\varphi)^\circ$ или $(360-\varphi)^\circ$ положение „изображения“ — то же, что и при $(+\varphi)^\circ$, но оно лежит по другую сторону от средней плоскости. На высоких тонах при значительных разностях фаз наблюдается не одно звуковое „изображение“, а несколько¹, что, повидимому, стоит в связи с тем, что на расстоянии между ушами укладывается несколько звуковых волн. Для звуков выше 1 500 кол./сек. суждение о направлении по разности фаз становится уже невозможным. Стюарт показал, что между отношением разности фаз φ звуков в ушах к углу сдвига „изображения“ α

¹ R. Hartley, Phys. Rev., 13, p. 373, 1919.

от средней плоскости и высотой тона N существует линейное соотношение (рис. 16):

$$\frac{\varphi}{\alpha} = 0,0036 N + 0,7, \quad (1)$$

справедливое от $N = 100$ до $N = 1200 \frac{\text{кол}}{\text{сек}}$.

При больших частотах это соотношение оказывается почти прямой пропорциональностью, так как первый член гораздо больше, чем 0,7. Как мы уже упомянули — при

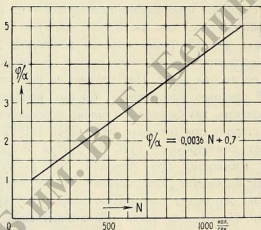


Рис. 16. Линейная зависимость между частотой N и отношением φ/α разности фаз к углу сдвига изображения.

данной разности фаз получится некоторая разность времен прибытия одинаковых фаз звуковой волны к двум ушам:

$$\Delta t = \frac{\varphi}{2\pi N}, \quad (2)$$

поэтому написанная выше зависимость (1) для высоких тонов может быть приближенно выражена следующим образом:

$$\frac{\alpha}{\Delta t} = \frac{2\pi}{0,0036} \approx 1700. \quad (3)$$

Таким образом из опытов Стюарта приближенно следует, что угол сдвига звукового „изображения“ пропорционален разности времен прихода одинаковых фаз звуковой волны к двум ушам.

Если выразить α в градусах, то получится приблизительно:

$$\alpha^\circ \approx 10^5 \Delta t, \quad (4)$$

то есть, что при одинаковой разности времен прихода звука к двум ушам должен получаться одинаковый угол сдвига „изображения“, независимо от высоты тона.

Итак, в области высоких тонов опыт хорошо подтверждает третью гипотезу, а именно, что суждение о направлении определяется разностью времен прихода звука к двум ушам.

Для низких тонов, как показывает график на рис. 16, мы уже не можем считать точным сделанное при выводе форм. (3) приближение и, следовательно, не имеем простой связи между разностью времен Δt и углом сдвига. Возможно, что здесь играет роль ряд обстоятельств, теорией не учтенных: несимметричное расположение ушей на голове, форма ушной раковины и др. Гипотеза разностей времен получила новое подтверждение в опытах Горнбостеля и Вертгеймера¹ с короткими звуковыми импульсами (а не длительными тонами, как в

¹ E. Hornbostel und M. Wertheimer., Berl. Ber., 20, S. 338, 1920.

опытах Стюарта). Эти авторы нашли, что при разности времен в 0,00003 сек. звук кажется приходящим в направлении, сдвинутом на 3° вбок от средней плоскости; это соответствует разности ходов звука, равной всего 1 см. При разности времен в 0,00063 сек. получается сдвиг на 90° — звук кажется идущим справа или слева; это соответствует разности ходов звука в 21 см. При еще больших промежутках времени получается также ощущение звука, идущего сбоку, но по мере увеличения промежутка времени суждение о направлении становится все менее и менее определенным. При интервалах, больших 0,00120 сек., два импульса воспринимаются уже раздельно. Надо отметить, что расстояние в 21 см не соответствует ни полупериметру головы, ни расстоянию между ушами человека.

Если мы подсчитаем по формуле (4), какому промежутку времени соответствует предельно ощутимый угол отклонения от средней плоскости, т. е. угол в 3° , то получим $\Delta t = 3 \cdot 10^{-5}$ сек., т. е. как раз величину, найденную Горнбостелем и Вертгеймером. Совпадение это показывает несомненно, что разность времен является главным фактором, обуславливающим бинауральный эффект. Однако объяснение ряда фактов, как, например, определения направления звуков, идущих сзади наблюдателя, наталкивается на известные трудности. Согласно опытам с импульсами суждение о звуках, идущих сзади, получается неуверенным, из опытов же с длительными звуками — оно возможно только при тонах не выше первой октавы (400—500 кол./сек.), высокие же тоны дают при увеличении разности фаз до 180° некоторый сдвиг — меньший, чем 90° , а затем звуковое изображение перескакивает на другую сторону.

Изложенные факты заставляют некоторых авторов не удовлетворяться теорией разности времен. Гартлей и Фрей¹ выдвигают теорию совместного действия разности времен и разности интенсивностей. Основная идея этих авторов такова: при звучании в свободном пространстве действительного источника звука в обоих ушах получаются известные значения интенсивностей и фаз, которые определенным образом связаны друг с другом. Эти значения, которые при данных размерах головы и расположении ушей на голове зависят от высоты тона и от направления, в каком доходят звуковые волны, и дают нам возможность судить как о расстоянии источника звука от уха, так и о направлении на него. Длительная привычка позволяет координировать эти связанные значения интенсивностей и фаз с определенным направлением даже и при разных высотах тонов. Надо указать, что с этой точки зрения очень трудно объяснить восприятие направления звуков сложного состава, что является серьезным возражением против теории Гартлея и Фрея.

В связи с бинауральным эффектом стоит открытое Лэном² явление особого рода биений. Если два звука, близкие по высоте тона, подводятся к разным ушам, причем сила звука настолько мала, что звук, слышимый одним ухом, не может достичь другого (ослабление в сотни тысяч раз), то все-таки наблюдаются биения, т. е. кажущееся изменение силы звука. При тонах выше 800 кол./сек. этого явления больше не наблюдается. Если период биений удлиняется до одной секунды, то ощу-

¹ R. Hartley and Th. Frey, 18, p. 431, 1921; Bell. Syst. Techn. Journ., Vol. 1, 1922.

² C. Lane, Phys. Rev., 26, p. 401, 1925.

щение биений переходит в ощущение „блуждания“ звука вокруг головы. Таким образом наблюдаемое явление, очевидно, имеет своей причиной бинауральный эффект, почему оно и исчезает для высоких тонов, чего не должно получаться для случая обычного типа биений, обусловленных интерференцией. Открытые Лэном биения мы вправе поэтому назвать „субъективными“, так как их причина заложена в процессах, связанных с мозговыми центрами. Биения обычного характера при бинауральном слушании также возникают, но только при условии значительно большей силы одного из звуков, когда он, проходя через череп, создает биения, интерферируя со слабым звуком, поступающим непосредственно в другое ухо. Наблюдения соотношений сил звуков при условии наиболее резко выраженных биений позволяют определить, как велико ослабление звука при прохождении через череп: ослабление оказывается на 40—60 TU , т. е. в среднем в 10^5 раз, что хорошо совпадает с определениями ослабления звука, найденными на основании явления маскирования звука (см. стр. 68).

Практические приложения бинаурального эффекта. Совершенно очевидно, что точность определения направления по слуху зависит от длины базы, лежащей в основе этого субъективного измерения, т. е. от расстояния между ушами. По этой именно причине все большие животные очень точно определяют направление звука. Если мы сделаем два звукоприемника, например рупора, и поместим их на большом расстоянии друг от друга, а звуки, ими воспринимаемые, будем подводить отдельно к двум ушам, то мы будем иметь увеличенную базу для измерения. И этим увеличим остроту оценки направления во много раз. Этот эффект

аналогичен стереоскопическому и может быть назван стерео-акустическим эффектом. По этому принципу устраиваются так называемые пеленгаторы, изобретенные во время европейской войны и применяющиеся для нахождения положения различных источников звука под водой и в воздухе (аэропланы, подводные лодки). Воздушные пеленгаторы при базе в два метра дают оценку направления с точностью до $1/2^\circ$. Под водой скорость звука в 4,3 раза больше, чем в воздухе, и поэтому для получения того же самого масштаба (той же остроты) при определении направления, как в воздухе, надо сделать базу в 4,3 раза большею. Эта идея положена в основу так называемого „водяного черепа“ Боулкера¹ для определения направления звуков под водой. Хотя в земле звук распространяется лишь немного быстрее, чем в воздухе, однако, для увеличения чувствительности при подслушивании минных работ на войне и в горном деле два звукоприемника (геофоны) ставятся на расстоянии метра и больше, что вызывает, конечно, искажение масштаба при оценке угла. Однако, здесь ценится не столько верный масштаб в оценке угла, под которым идет звук, сколько уточнение локализации звука в средней плоскости при перемещении звукоприемников-геофонов.

Бинауральный эффект может служить довольно точным методом измерения коротких промежутков времени — до нескольких сотых долей секунды. Действительно, если два звуковых импульса, отстоящие друг от друга по времени на $3 \cdot 10^{-5}$ сек., будут подведены к разным ушам, то нам покажется, что источник звука

¹ T. Bowler, Brit. Pat., 15, p. 102, 1910.

смещен от средней плоскости в ту или другую сторону на $3-4^\circ$. Большие промежутки времени дают больший сдвиг в сторону. Субъективная оценка угла может быть пересчитана на промежуток времени; но выгодней воспользоваться тем обстоятельством, что оценка направления слухом острее всего около средней плоскости. Это бессознательно чувствует каждый человек и животное) поворачивая лицо к звуку, к которому он прислушивается. Если мы введем на пути звука какую-нибудь среду, скорость звука в которой хорошо известна, например, трубку с воздухом известной длины, то мы можем заставить ранее приходящий звук запоздать на совершенно определенный промежуток времени и добиться того, чтобы он пришел одновременно с более поздним. При помощи такого компенсатора всегда можно достичь того, что звук будет казаться идущим как раз спереди, и затем уже мы можем по длине пути звука в компенсаторе вычислить разность времен¹. Этот метод очень удобен для ряда испытаний и исследований, например для определения времени запаздывания реле, для измерения скорости звука в разных средах, для определения расстояния под водой с точностью до нескольких сантиметров (по времени прохождения звука между двумя точками), для учета скорости течения жидкостей и т. п.

Нельзя не упомянуть еще об одной интересной области, где бинауральный эффект играет важную роль. Несомненно, что глухие на одно ухо хуже разбирают речь, и это происходит не столько из-за ослабления громкости звука, сколько благодаря уменьшению раз-

¹ W. Kunze. Phys. ZS., 22, S. 649, 1921; ZS. f. techn. Phys., 3, S. 48, 1922; M. Reich. Verh. d. Deutsch. Phys. Ges., 4, S. 24, 1923.

борчивости восприятия. Когда мы слушаем одним ухом, то легко заметить, что речь кажется гулкой и неясной, а слушая того же оратора двумя ушами, мы его речь легко разбираем. Ясно, что для разборчивости восприятия играет роль известная пластичность звукового образа, тот стерео-акустический эффект, о котором была выше речь и который позволяет различать звуки не только по их временной последовательности, но и по их пространственному соотношению. Отсюда видно, что предел реверберации (гулкости) помещений, который определяет их акустическую пригодность для музыкального исполнения и лекций ¹, является в сильной степени зависящим от бинаурального эффекта, и потому для людей одноухих реверберация должна была бы быть сделана гораздо меньше. Эти соображения находят себе оправдание в области радиовещания, где мы имеем восприятие звука, передачу его и прием слушателем „одноухим“ способом, где стерео-акустический эффект целиком исключен. И действительно, при этих условиях для разборчивой передачи приходится значительно уменьшать реверберацию студий радиопередачи против нормальных условий. Опыты передачи с применением двух микрофонов и двух линий и при восприятии двумя разными ушами показали, что имеется полная возможность более совершенной — „пластической“ передачи звука, что сулит ряд новых возможностей в этой области. Вопрос этот часто дебатировался теперь в специальной литературе ².

¹ См., напр., С. Лившиц. Архитектурная акустика, Москва, 1927 г.

² E. Meyer, El. Nachr. Techn., 11, S. 137, 1927; H. Hollman, El. Nachr. Techn. 4, S. 180, 1927.

Глава VII

СТРОЕНИЕ ГОЛОСОВОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА. ЕГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ

Строение голосового аппарата анатомически значительно проще, чем строение уха, и гораздо лучше исследовано благодаря возможности изучения его в момент его функционирования непосредственно у живых людей посредством ларингоскопии и рентгеновских снимков.

Голосовой аппарат (рис. 17) состоит из трех главных частей: 1) легких с системой дыхательных и выдыхательных мышц, 2) гортани с голосовыми связками, или „губами“ по терминологии Музеholds¹ и 3) системы воздушных полостей, играющих роль резонаторов и излучателей звука (рот, нос).

Как физический инструмент, голосовой аппарат совершенно основательно сравнивают с языковой органной трубой. Из трех частей его наименее подобны язычку органной трубы, конечно, связки, но в принципе роль их та же самая, какую в трубе играет язычок. Связки во время голосообразования (фонации) представляют собою два стоящие параллельно и прижатые друг к другу

¹ A. Muehold. Akustik und Mechanik d. menschlichen Stimmorgans, Berlin 1913; имеется русское издание, Госиздат, 1926.

мускульных валика, длина и степень натяжения коих определяют высоту издаваемого тона. Голос может изменяться по высоте в пределах около двух октав¹, но наряду с нормальным — грудным голосом — человек может издавать особые звуки, более высокие — это так называемый фальцет, или фистула. На механизме голосообразования при грудном голосе и фальцете следует остановиться несколько подробнее ввиду большого интереса этого вопроса, подробно освещенного М у з е х о л ь д о м при помощи ларингоскопической фотографии; при соединении этого метода со стробоскопом М у з е х о л ь д у удалось проследить отдельные фазы раскрытия голосовой щели.

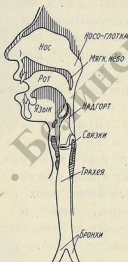


Рис. 17. Схема строения голосового аппарата человека.

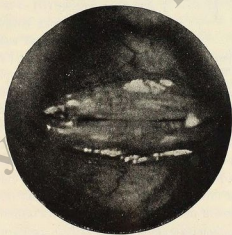
Натяжение голосовых связок может происходить или благодаря сокращению мускульных волокон, составляющих самые связки — это так называемое внутреннее натяжение, или посредством воздействия других мышц гортани, растягивающих связки пассивно, — это

¹ Пределы по высоте (диапазон) для различных типов голосов следующие:

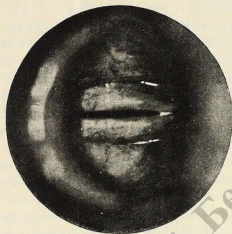
Бас	E (80 кол./сек.) — e' (320 кол./сек.)
Баритон	G (96 " ") — g' (387 " ")
Тенор	H (122 " ") — h' (488 " ")
Контральто	d (145 " ") — d'' (580 " ")
Сопрано	e' (259 " ") — e''' (1034 " ")

внешнее натяжение. Характер функционирования связок в этих двух случаях совершенно различный. На моментальных фотографиях голосовой щели при грудном голосе (см. рис. 18, А, представляющий фотографию связок баритона, поющего тон c^1 — 259 кол./сек., forte) связки представляются подобными двум толстым напряженным мускульным валикам, похожим на губы, плотно сжатые друг с другом; это соответствует как внешнему, так и „внутреннему“ натяжению связок. Музельхот установил, что при фонации грудным голосом раскрытие голосовой щели происходит лишь на очень короткий момент в течение малой части периода звукового колебания, и за это время через щель проходит сильный прорыв воздуха, в остальную же часть периода связки плотно сжаты. Периодическое следование таких толчков дает звук, богатый обертонами, амплитуда которых лишь очень медленно убывает с увеличением высоты, что придает тембру характер полноты и металлический оттенок. При таком звуке передняя грудная стенка дает сильное дрожание (*fremitus pectoralis*), осязаемое рукой, почему этому типу голоса и дано название грудного регистра.

При фальцете связки представляются плоскими и сильно растянутыми, и между ними в середине образуется просвет, как между двумя туго растянутыми резиновыми полосками (см. рис. 18, В). Края связок утончены и, повидимому, не имеют такой упругости, как при грудном звуке; при фонации колеблются, отодвигаясь вверх и вбок, главным образом, края связок; полного закрытия голосовой щели не получается даже в момент фазы



А



В

Рис. 18. А — стробоскопический снимок связок при фонации грудного тона ($c_1 = 259$) в момент наибольшего закрытия голосовой щели; баритон, forte. В — баритон, фальцетный тон; нестробоскопический снимок, показывающий, что голосовая щель не смыкается.

наибольшего сближения связок. Полного прерывания тока воздуха при фальцете таким образом не получается, происходят только ослабление и усиление его. Фальцетный голос вследствие этого не богат обертонами, он звучит очень мягко, не обладает металлическим оттенком (высокие обертоны) и не имеет силы. Дрожания грудной стенки также не получается. Гипотетический разрез через голосовые связки при фонации грудного и фальцетного тона представлен на рис. 19, А и В. Следует отметить, что

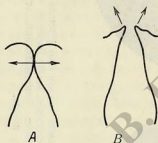


Рис. 19. А — разрез через голосовые связки при фонации в грудном регистре; В — то же при фальцете. Стрелки показывают направление колебаний связок.

колебания голосовых связок (показаны на рис. 19 стрелками) при грудном голосе (А) происходят, повидимому, в направлении, перпендикулярном к току воздуха через щель, при фальцете же (В) — почти в направлении тока воздуха.

Звук, создаваемый вибрацией голосовых связок, равно как и вибрацией язычка органной трубы, совершенно видоизменяется благодаря наличию резонансных полостей.

Резонансные полости глотки и рта играют прежде всего роль усилителей тех обертонов звука связок, которые лежат близко от собственного тона полости. Ввиду того что стенки этих полостей мягки, резонанс их не ограничивается узкой областью тонов; так, отступление от тона полости на большую терцию (на 25%), дает уменьшение резонирования всего наполовину. В результате такая резонансная полость усиливает обертоны голоса

на протяжении почти целой октавы (см. ниже рис. 23, 24, 27). Таким образом ясно, что тембр звука голоса будет существенным образом зависеть от настройки резонаторных полостей, — главным образом полости рта и глотки. Чрезвычайно важно отметить, что полость рта является, кроме того, резонатором с большим отверстием во внешнее пространство и потому является излучателем звука или, применяя термин из радио-телеграфии, звуковой антенной.

Полость носоглотки, как лежащая сбоку, может являться своего рода звуковым фильтром: она может определенные тоны поглощать и не выпускать наружу. Действие ее можно уподобить так называемому интерференционному аппарату Штумпфа, где мы имеем на пути звука, проходящего по трубе, боковые ответвления (трубки переменной длины с глухим концом), которые поглощают тоны, соответствующие их настройке. Особенно важна эта роль носоглотки в пении для придания звуку голоса известной окраски, чем в широкой степени пользуются все певцы. Если небная заслонка открыта и ток воздуха попадает в значительной степени из легких в нос, то носовая и носоглоточная полость делаются резонаторами и это придает звуку специфический „гнусавый“ оттенок, применяемый для издания целого ряда согласных и полугласных (*м, н, б, д, г*).

Форма полости рта и глотки при фонации гласных показана на рис. 20¹. Правильность этих рисунков проверена в недавнее время помощью рентгеновских снимков². Характерно, что при образовании всех без исключения

¹ Взято из книги: Rippmann. Elements of Phonetics, London, 1914.

² J. Crandall, Bell. Techn. Journ. 6, p. 100, 1927.

гласных воздушная резонаторная полость разделена на две части, между которыми заметно некоторое сужение; таким образом при фонации гласных весь воздушный резонатор разбивается на два более или менее тесно друг с другом связанных резонатора, что должно проявиться

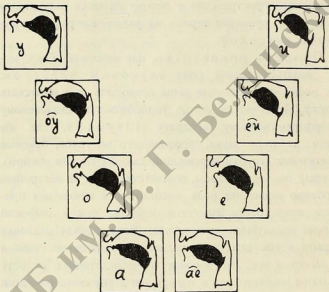


Рис. 20. Форма полости рта при фонации различных гласных. в образовании двух различных резонансных частот. При фонации гласных у, о, а сужение образуется между корнем языка и нёбной заслонкой (язычком); при фонации е и и сужение образуется между горбом, образуемым поднятым кверху языком и твердым нёбом и, таким образом, получается задний резонатор большого объема (низкого тона) и передний — узкий, маленький

резонатор (высокого тона). Увеличение ротового отверстия повышает тон резонатора и увеличивает его затухание. Декремент затухания резонаторов оценивается от 0,1 до 0,3¹. Гайморовы полости, лобные пазухи и др. внутренние полости не могут играть ни в определении гласных, ни даже в придании тембральной окраски голосу: никакой роли по той простой причине, что проходы, к ним ведущие, слишком узки и почти всегда закрыты слизью, что препятствует проникновению в них звука и делает их изолированными резонаторами, которые, следовательно, если и приходят в созвучание через костную проводимость, то почти не могут отдать своего звука в наружный воздух, т. е. не влияют на объективно слышимый звук голоса.

Влияние на тембр голоса воздушных полостей, лежащих ниже, чем связки, вполне допустимо, но до сих пор вопрос этот еще слабо освещен. Ясно, однако, что в образовании гласных участвуют исключительно верхние полости, лежащие над связками. Нижний резонатор (трахея, бронхи, рис. 17) должен, конечно, играть важную роль в определении характера функционирования связок, так как степень натяжения и большая или меньшая быстрота открывания и закрывания голосовой щели, т. е. факторы, определяющие первичный тон связок, зависят не только от структуры и натяжения самих связок, но и от реакции переменного воздушного давления в подсвязочном пространстве. Вопрос о резонансе нижних полостей приобретает важную роль в объяснении явлений постановки певческого голоса.

¹ S. Garten, Leipziger Abhandl., 38, 7, 1921; В. Казанский и С. Ржевкин, Журнал Прикладной Физики, 5, стр. 87, 1927.

При фонации согласных звук может производиться не только связками, но и еще посредством ряда способов, как-то: трением струи воздуха, прорывающейся в узкое отверстие между зубами (*з, с*), между языком и твердым нёбом (*ж, ш, ч*) или мягким нёбом (*г, к*), между зубами (*б, п*), между языком и зубами (*д, т*), прерывистым движением языка (*р*), возбуждением звучания носовой полости (*м, н*).

Глава VIII

АНАЛИЗ ЗВУКОВ РЕЧИ И ЗАПИСЬ ИХ. ТЕОРИИ ОБРАЗОВАНИЯ ГЛАСНЫХ. АНАЛИЗ ПЕВЧЕСКОГО ГОЛОСА. АППАРАТЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЗВУКА

Простейшим образом анализ звука гласных удается осуществить непосредственно ухом, придавая ему в помощь резонаторы с различной настройкой, как это сделал в своих классических работах еще Гельмгольц, или пользуясь отзвуком камертонов, возбужденных звуком голоса, как это делает Штумпф¹. Эти исследования позволили установить с несомненностью, что для каждой гласной существует известная характеристическая область, неизменная по высоте, где звуки обертонов особенно сильны. Гельмгольц² нашел следующие характеристические области для различных гласных:

	I	II
1) У	f — 176	—
2) у ^о	f' — 352	—
3) О	b' — 466	—
4) А	b'' — 932	—

¹ C. Stumpf, Die Sprachlaute, Berlin, 1926, J. Springer.

² H. Helmholtz, Die Lehre von den Tonempfindungen, S. 178.

	I	II
5) А ^е	d'' — 594	g''' — 1584
6) Е	f' — 352	b''' — 1864
7) И	f — 176	d''' — 2376

(в этой таблице принято а' — 440 кол./сек.)

Он объясняет образование гласных следующим образом: звук, даваемый связками и имеющий в своем составе большое число обертонов, поступает в полость глотки и рта, которые представляют из себя сложной формы резонатор, усиливающий все обертоны, лежащие близко от его собственной резонансной частоты. В случае гласных у, у^о, о, а имеется одиночный резонатор, в случае гласных а^е, е, и — резонатор двойной: задняя часть его — большого объема, передняя же, образуемая языком и губами, мала по объему и узка. Задний резонатор усиливает низкую область частот, передний — высокую. Таким образом, по Гельмгольцу, составные части звука гласных являются гармоническими обертонами основного тона, даваемого связками; число их колебаний в целое число раз превышает число колебаний основного тона, настройка же резонансной полости, очевидно, может быть по отношению основного тона какой угодно.

Физиолог Германн¹ смотрит на дело несколько иначе: он предполагает, что каждый воздушный толчок, создаваемый связками, возбуждает колебания резонатора с присущей ему частотой и затем эти колебания быстро затухают, пока не будут вновь возбуждены следующим воздушным толчком (возбуждение звука такими резкими

¹ L. Hermann, Phonophotogr. Untersuchungen, Pflüg. Arch., 47, S. S. 45 u. 347, 1890.

толчками, как мы упомянули выше, происходит только при звуках грудного регистра). Таким образом кривая звука гласной должна состоять из чередования серий затухающих колебаний, имеющих высоту, определяемую собственным периодом резонатора и следующих друг за другом с частотой колебаний связок. Согласно взгляду Германа, тон возбуждаемого таким образом резонатора может и не быть гармоническим обертоном основного тона связок. Для данной гласной характерна высота того (затухающего) тона резонатора, который возбуждается при каждом воздушном толчке. По Герману звуковая кривая гласной должна состоять, таким образом, из ряда затухающих колебаний, следующих друг за другом с частотой, задаваемой вибрацией связок. Собственный тон резонатора — форманта, как его называет Герман, может, вообще говоря, не быть гармоническим обертоном основного тона.

Термин „форманта“, введенный Германом, быстро привился в науке, но теперь он применяется не только как название определенного тона, характерного для данной гласной, а как обозначение характеристической области резонанса, в которой усиливается ряд гармоник звука, издаваемого связками.

Из кривых записи звука гласных, снятых самим Германом и, в последние годы, — усовершенствованными методами, о которых речь будет ниже, — Миллером, Тренделенбургом и др., видно, что в звуке гласных отдельные серии затухающих колебаний действительно следуют друг за другом, причем следуют через точно одинаковые промежутки времени (период основного тона связок), и отдельные периоды абсолютно тождественны друг другу (см. рис. 21,а).

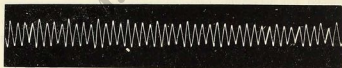
Между сторонниками теории Гельмгольца и Германна велась и ведется до сих пор горячая полемика, которая вряд ли была плодотворна, так как обе теории в сущности друг другу не противоречат, на что еще давно указал лорд Релей. Дело в том, что форма кривой, найденная Германном — чередование затухающих синусоид, — может быть разложена по



а. Гласная *a*, *Fis* — 92 кол./сек., бас (Миллер).



б. Гласная *a*, *h'* — 488 кол./сек., сопрано (Миллер).

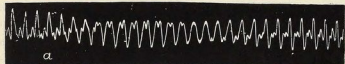


с. Гласная *a*, певческий звук, *c* — 129 кол./сек., баритон (Казанский и Ржевкин).

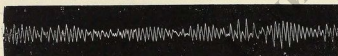
Рис. 21. Записи звука голоса.

теореме Фурье в ряд гармонических составляющих. Максимум области усиления гармоник, обусловленный резонансом (см. рис. 23, 24), будет соответствовать форманте по Германну, причем этот максимум резонанса может, конечно, и не совпасть ни с одним из гармо-

нических обертонов, что не мешает, однако, всем составляющим тонам оставаться гармоническими. Форма звуковой кривой, вытекающая из теории Гельмгольца, не ограничена ничем, она может быть, в частном случае звуков грудного регистра, такой, как находит Германн,



d. Закрытый звук, a^y , es' — 308 кол./сек., бас Тихонов (Казанский и Ржевкин).



e. Закрытый звук, a^y , e' — 326 кол./сек., баритон Воробьев, (Казанский и Ржевкин).



f. Согласная p — 454 кол./сек. (Тренделенбург).



g. Согласная s , средн. чистота — 6000 кол./сек. (Тренделенбург).

Рис. 21. Записи звука голоса.

но может иметь и другую форму (например в случае фальцета или у женских голосов). Таким образом взгляд Гельмгольца более общий — он охватывает тот частный случай, который берет Германн. Физическая концепция явления обеих теорий друг другу не противоречит. Говорить ли о звучании пульсирующей

с частотой основного тона форманты (Германн) или о сочетании ряда гармоник, которые в сумме дают той же формы кривую (Гельмгольц),—является безразличным.

Однако предположение Германна о существовании в звуке гласных негармонических составляющих тонов ошибочно, и на этом следует остановиться подробнее. Из кривых записи звука можно заключить, что действительно период затухающих колебаний, входящих в состав звуковой кривой, соответствует негармоническим обертонам, но отсюда еще нельзя сделать вывода, что есть негармонические обертоны, т.е. незатухающие составляющие звука, и что они будут слышны уху. Не надо забывать, что наше ухо производит анализ „по Фурье“, т.е. разлагает сложной формы периодическую кривую на ряд незатухающих синусоид (закон Ома); ритмическое чередование затухающих синусоид будет разложено ухом на ряд незатухающих обертонов от основного тона, каков бы ни был кажущийся период затухающей синусоиды, т.е. какова бы ни была высота форманты. Вот почему являются совершенно беспочвенными попытки некоторых авторов¹ производить математически разложение звуковых кривых на ряд затухающих синусоид, негармонических с основным тоном, хотя такое разложение иногда может быть сделано при помощи меньшего количества (даже всего одной) компонент.

Тождественность отдельных периодов в звуковых кривых гласных, находимая всеми авторами, а равно и самим

¹ E. Scripture. Researches in exp. Phonetics, Washington, 1906.

Германном, служит несомненным признаком того, что в составе звука гласных не существует негармонических обертонов, хотя резонаторная полость зачастую и имеет собственный период, негармонический к основному тону.

Цваардемакер¹ исследовал колебания связанных систем резонаторов и нашел значительное смещение резонансных максимумов от гармонического соотношения с возбуждающей частотой, откуда делает вывод о возможности присутствия негармонических обертонов в гласных, причем базируется на работах Вина. Однако, теория колебаний связанных систем, развитая М. Винем², показывает, что вынужденные колебания, не гармонические с основным тоном, ни в каком случае возникнуть не могут. В своих же опытах Цваардемакер имел дело с собственными колебаниями системы, на которые нельзя перенести выводы, относящиеся к вынужденным колебаниям.

Опытные результаты Гартена³, который нашел при помощи плавно перестраивающегося резонатора наличие негармонических обертонов в звуке гласных, объясняются вероятнее всего тем, что перестройка резонатора производилась недостаточно медленно, чтобы в нем мог установиться стационарный режим вынужденных колебаний.

Все вышесказанное мы можем резюмировать следующим образом: в составе звука, излучаемого голосовым аппаратом человека при фонации гласных, вообще говоря, не содержатся

¹ См. Handb. d. Physik, herausgeb. von Geiger u. Scheel Bd. VIII, S. 474.

² M. Wien. Wied. Ann., 61, S. 151, 1897.

³ S. Garten. Leipziger Abhandl. 38, S. 7, 1921.

негармонические частоты (которых нет в первичном звуке связок), поскольку мы имеем тождественные друг другу последовательные периоды кривой. Наоборот, если мы имеем кривую, постепенно изменяющуюся от периода к периоду, — негармонические обертоны заведомо есть.

Вопрос о записи звуковых волн был удовлетворительно разрешен еще в 1859 г. Скоттом¹ при помощи так называемого фонавтографа, прототипа современных фонографа и граммофона, изобретенных несколько позже.

Фонографические и граммофонные записи в настоящее время достигли весьма большой степени совершенства, и потому анализ записей представляет серьезный научный

¹ E. Scott. Kosmos, 14, p. 314, 1859.

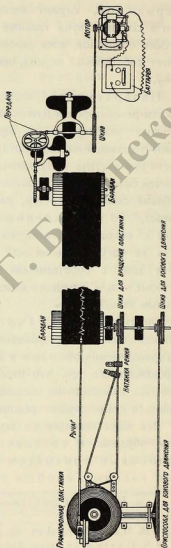


Рис. 22. Прибор для расшифровки граммофонных записей (по Скрипичу).

интерес и дает очень ценные результаты. Удобный аппарат для расшифровки записей грамофонной пластинки разработан Скрипчюром¹ и изображен на рис. 22.

Я лишь бегло упомяну о ряде старых методов записи звуков, нередко замечательных по своему остроумию, но в большинстве случаев дающих искаженную кривую звука, по которой не удастся судить об истинной форме кривой, если в нее не внести ряда поправок, которых авторы не делали. Таковы: запись колебаний манометрического пламени (Кёниг), запись при помощи различных мембран (Германн и др.), запись при помощи угольного микрофона и осциллографа (Рамзай), запись при помощи мыльной пленки (Гартен).

Очень интересный метод записи звука предложил известный физиолог Эйнтговен². Тончайшая кварцевая нить менее 1 μ диаметром подвешивается в слабо натянутом состоянии в устье рупора; она настолько легка, что свободно увлекается самыми быстрыми колебаниями воздуха. Колебания нити наблюдаются, так же как и в струнном гальванометре Эйнтговена, через микроскоп, при сильном освещении и фотографируются на подвижной ленте. Метод Эйнтговена дает кривую, близкую к колебаниям частиц воздуха, тогда как методы записи на мембрану дают кривую звукового давления.

Так как звуковое давление связано с амплитудой A следующим соотношением:

$$P = 2\pi\nu\rho NA,$$

¹ E. Scripture. Researches in exper. Phonetics, Washington, 1906.

² W. Einthoven und S. Hoogerwerf, Pflüg. Arch. 204, S. 275, 1924.

где v — скорость звука, ρ — плотность среды, N — число колебаний в секунду, то ясно, что в силу влияния множителя N , кривые Эйнтговена несравнимы непосредственно с кривыми, записанными другими методами. Главный недостаток этого способа — малая чувствительность, что вызывает необходимость применять рупор, влекущий неизбежные искажения.

Принципиально чрезвычайно важен метод записи звуковых колебаний при помощи оптического интерферометра¹, так как здесь регистрируются непосредственно колебания плотности воздуха на пути одного из лучей интерферометра под влиянием звуковых колебаний в данной области. Недостаток этого метода — его очень малая чувствительность.

Началом строго обоснованных объективных исследований звуковых колебаний следует считать исследования Дейтона Миллера в Америке (законченные к 1914 г. и описанные в его чрезвычайно интересной книге „Наука о музыкальных звуках“²), которые представляют огромный шаг вперед в деле изучения звука вообще и голоса в частности. Для записи звука Миллер применяет прибор, названный им „фонодейк“, состоящий из тонкой стеклянной мембраны (с рупором), которая передает свои колебания маленькому зеркальцу, вращающемуся на оси. Прибор очень чувствителен и отмечает звуки до 10 000 кол./сек. В принципе этот прибор был не нов, но весьма рационально сконструирован.

Чрезвычайно важно в исследовании Миллера то, что он впервые попытался произвести выяснения тех

¹ A. Raps. Wied. Ann. 59, S. 193, 1893.

² Dayton Clarence Miller., The Science of Musical Sounds, 2-nd edition, New-York, 1922.

Для градуировки прибора Миллер применил набор закрытых органных труб от 129 до 4138 кол./сек., одинаковой громкости на слух. Такая градуировка оказалась чрезвычайно кропотливым и трудным делом и заняла, по расчету автора, в общем $3\frac{1}{2}$ года ежедневной 8-часовой работы одного исследователя. Однако, в результате этой работы, получилась возможность учесть искажения, вносимые различными рупорами и мембранами, и вычислить относительную силу гармонических

бранами, и вычислить относительную силу гармонических обертонов различных звуков. Применяя трубы одинаковой громкости (субъективной), Миллер, конечно, упростил задачу, но, не учтя уменьшения чувствительности уха в

Рис. 23. Спектры* голоса сопрано и баса на гласной *a* (Миллер).

области низких тонов, ввел значительную ошибку. Следует думать, что все анализы Миллера дают в десятки раз преуменьшенную объективную силу звука низких тонов. Возможно, что спектры Миллера дают известное представление о субъективной громкости гармоник, но только в тех случаях, когда сила звука мала, так как при сильных звуках образование комбинированных тонов вносит фактор, весьма трудно учитываемый (см. гл. IV).

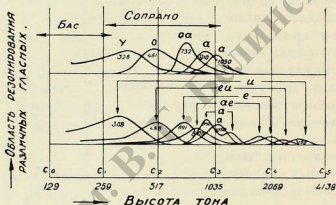


Рис. 24. Положение формант различных гласных.

Гармонический анализ всех записанных кривых Миллер представил в очень удобной графической форме, которая позднее получила название „звуковых спектров“. Рис. 23 представляет, например, „спектр“ гласной а (как в английском слове father), пропетой сопрано на высоте 488 кол./сек. и басом на высоте 92 кол./сек. (соответствующие кривые даны на рис. 21, а и б), причем по оси абсцисс отложены в логарифмическом масштабе высоты тонов, а по оси ординат — интенсивность отдельных гармоник в виде пирамидок.

Из спектра гласной *a* у баса видно, что 7-я, 8-я, 9-я и 11-я гармоники сравнительно сильны, особенно выделяется 8-я гармоника — 732 кол./сек. Интенсивность основного тона и всех гармоник до 6-й по данному анализу так мала, что на чертеже отмечена быть не может. Для сопрано особенно сильна 2-я гармоника — 977 кол./сек. Как я уже указывал, Миллер недооценивает силу низких гармоник, что и подтвердили позднейшие исследователи. На рис. 24 изображен общий статистический результат анализа различных гласных, вытекающий из работы Миллера. Кривые, нанесенные на чертеже, представляют из себя резонансные области, где усиливаются обертоны различных гласных, произносимых на разных высотах и разными голосами. Гласные *a*, *oa*, (среднее между *a* и *o*), *o* и *y*, на какой бы высоте они ни произносились, всегда имеют одну определенную область усиления обертонов; для *a* она — самая высокая, около 1 000 кол./сек. (c^3), для *y* — самая низкая — около 300 кол./сек. Каждая из гласных *ae*, *e*, *ei*, *i* — имеет две характеристические области — одну, низкую и одну высокую; для *i*, например, они лежат около 300 и 3 000 кол./сек.

Однако совершенно бесспорный, свободный от искажений метод записи звука удалось разработать лишь при помощи превращения звуковых колебаний в электрические и записи их на высоко-периодный осциллограф или струнный гальванометр. Это превращение звука в электрические колебания может быть получено без всяких искажений при помощи конденсаторного микрофона, впервые разработанного теоретически и конструктивно американским физиком Венте¹. Конденсаторный

¹ E. Wente. Phys. Rev., 10, p. 39, 1917; 11, p. 450, 1918.

микрофон состоит из неподвижного массивного цилиндрического электрода и из туго натянутой тончайшей стальной мембраны, лежащей от него на расстоянии нескольких сотых миллиметра и электрически от него изолированной. Если такой конденсаторный микрофон включить в цепь батареи, то при колебаниях мембраны заряд конденсатора будет меняться, и эти колебания заряда могут быть усилены в любой степени посредством катодных усилителей и записаны любым методом, например осциллографом или струнным гальванометром.

Мембрана конденсаторного микрофона Венте имела большое затухание и очень высокий собственный период — до 12 000 кол./сек., который еще повышался благодаря упругости воздушной прослойки между мембраной и задним электродом до 17 000 кол./сек. В области звуков речи и музыки такая мембрана не имеет резонансных свойств и позволяет без искажения воспринять звуки от 25 до 8 000 кол./сек. Вся система усилителей и осциллограф также не дает искажений во всем звуковом диапазоне и передает идеально точно картину переменного звукового давления, действующего на мембрану микрофона. Благодаря возможности большого усиления пользование рупором не нужно, что избавляет от главного источника искажений, неизбежного во всех прежних записях.

Конденсаторный микрофон, несколько иного типа, предложенный Риггером ¹, отличается чрезвычайной легкостью мембраны (шелк, оклеенный алюминиевой фольгой в 1 μ толщиной) и несколько большим расстоянием между мембраной и задним электродом. Схема для записи при помощи этого микрофона разработана Трен-

¹ H. Rigger. Wiss. Veröff. aus d. Siemens Konzern, III/2, S. 67, 1924.

деленбургом¹ и оказалась практически столь же совершенной, как и схема, примененная в Америке (см. записи на рис. 21, f, g).

В результате многочисленных исследований с безупречной методикой мы имеем в настоящее время огромное количество совершенно надежных и объективно точных записей звука всех гласных и согласных, входящих в состав речи, певческого голоса и других звуков — музыкальных инструментов, различных шумов, биений сердца, отзвука в больших залах и т. п.

Запись звука усовершенствованными методами привела к обнаружению некоторых новых особенностей гласных, ранее не известных, а также и к выяснению физической природы согласных, ранее вообще мало известной. Тренделенбург в результате своей работы обнаружил, что гласные *a*, *o* и *u* всегда обладают кроме низкой форманты еще характеристическими призвуками в высокой области — выше 3 000 кол./сек. Эти призвуки характерны не для гласной, а для индивидуального тембра голоса; особенно сильны эти призвуки в гласной *a*. Прежние методы записи были, повидимому, недостаточно чувствительны в области высоких тонов, чтобы обнаружить эти особенности. Тренделенбургом вновь определены также области формант всех гласных, причем он получил согласие с прежними работами. С данными Миллера имеется расхождение в области определения интенсивности низких частот, что и следовало ожидать по указанным уже нами причинам; низкие частоты в

¹ E. Trendelenburg, Wiss.Veröff. aus d. Siemens Konz. III/2, S. 43, 1924; IV/1, S. 1, 1925; IV/2, S. 200, 1925.

звук гласных часто имеют значительную интенсивность. Интересно отметить, что голос обученного певца дает более сильные основной тон и вторую гармонику

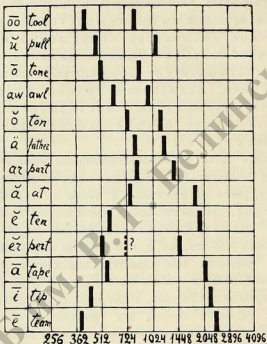


Рис. 25. Положение формант различных гласных по Крендаллу.

(октаву), что вполне сходится с исследованиями моими Казанского, о которых я упомяну далее.

Штумпф¹, исследуя тембр гласных на-слух, посредством отзвука камертонов, также обнаружил высокие

¹ C. Stumpf, Beitr. z. Anat. u. Physiol. d. Ohres, d. Nase u. d. Halses, 17, S. 151, 1921; ZS. f. Phys., 38, S. 745, 1926.

характеристические призвуки в тех же областях, как и Тренделенбург.

Чрезвычайно полный анализ звуков речи произведен Крендаллом¹ в лаборатории Вестерн-Электрик К⁰. Им записано несколько сотен звуков гласных и согласных, и все записи подвергнуты гармоническому анализу и представлены в виде спектров. Важнейший результат этой работы заключается в том, что для всех гласных найдено по 2 резонансных области (форманты). Сводка данных Крендалла для различных гласных мужского и женского голоса (в английском произношении) приведена на рис. 25. Прежние исследователи, начиная с Гельмгольца и кончая Миллером, находили для гласных у, о и а только по одной области резонанса, что объясняется близостью областей резонанса для этих гласных.

Подсчет, произведенный Крендаллом, показывает, что наличие двух областей резонанса можно объяснить существованием двух связанных резонирующих полостей: задней — полость глотки и передней — полость рта, разделенных сужением, образуемым корнем языка и мягким нёбом (см. рис. 20). Результат подсчета периодов колебаний такой связанной системы двух резонаторов очень хорошо совпадает с результатом опыта для всех гласных.

По вычислениям Крендалла, для звуков от у до ä (см. рис. 25) передняя полость больше задней, причем для а она — наибольшая, для звуков же е, еи, и — наоборот, задняя полость больше передней. Главная резонансная полость, несомненно, передняя, так как она излучает звук; потому и форманта передней полости более характерна для данной гласной.

¹ J. Crandall, Bell. Techn. Jour. IV, p. 586, 1925.

Теория двойного резонанса гласных, развитая Крендаллом, базируется на интереснейших опытах Ричарда Педжета с искусственным воспроизведением звуков гласных (о чем будет речь в следующей главе) и подтверждена собственными опытами автора. Повидимому, эта теория в дальнейшем должна стать основной путеводной нитью при исследовании процесса голосообразования, в частности голосообразования певческого.

Средняя длительность гласных в американском языке, по измерениям Крендалла, составляет около 0,3 сек. причем 0,04 сек. звук нарастает, 0,17 сек. он остается постоянным и затем в течение 0,1 сек. убывает по силе.

Нам остается еще коснуться анализа звука согласных. Запись кривых при помощи конденсаторного микрофона позволила Тренделенбургу и Крендаллу разрешить и эту более сложную задачу. Полученные кривые согласных *л, м, н, р, б, п, т, ч, к, в, ж, з* показывают ясно выраженный период, соответствующий тону голосовых связок, лежащему в основе этих согласных (см. рис. 21, *f* — согласная *р*); но кроме того кривые всегда указывают на присутствие колебаний высокого периода, явно не гармонических с основным тоном, так как картина мелких колебаний, укладывающихся на каждом периоде кривой, для разных периодов оказывается различной. Оказывается, что возможно произнести согласные *л, м* и *н* так, что они дадут совершенно периодическую кривую, но тогда характер произносимой согласной значительно изменяется; *л, м* и *н* можно назвать „полугласными“. На основании анализов можно считать, что согласные представляют собой смесь нескольких звуков, негармонических друг с другом.

Откуда же может появиться другой звук, кроме звука связок? В случае согласных *л*, *м* и *н* на этот вопрос сравнительно легко ответить. Воздух, выходящий через голосовую щель и приводящий в колебание связки, далее выходит не через широкое отверстие рта, как в случае гласных, а через более или менее узкое отверстие (в случае *л* — между языком и зубами, в случае *м* — через нос, в случае *н* — через сжатые зубы), и

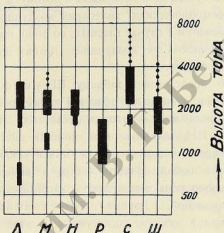


Рис. 26. Характеристические области согласных *л*, *м*, *н*, *р*, *с*, *ш* по Штумпфу.

потому может привести в колебание путем вдувания, полости, через которые он проходит. Таким образом резонаторные полости участвуют в звукообразовании двояко: с одной стороны, усиливая те или другие гармоники основного тона связок, а с другой — они возбуждаются к самостоятельным колебаниям и дают звуки, вообще говоря, негармонические с тоном связок.

Германи представлял себе именно таким образом возникновение гласных, но в кривых записей гласных каждый период подобен другому, а следовательно негармонические обертоны в них отсутствуют. Для проверки теории Германи, Тренделенбург снял звук гласной *a* с несоразмерно большой утечкой воздуха и обнаружил в кривой некоторую неодинаковость отдельных периодов, т. е. присутствие негармонических обертонов. Таким образом, возбуждение независимых и потому в некоторых случаях негармонических колебаний воздушных резонаторов, возможно и в случае гласных, но лишь при условии плохого использования воздушного потока для возбуждения звука связок.

Рис. 26 представляет таблицу Штумпфа¹, в которой показано положение областей характеристического резонанса (форманта) некоторых согласных. Эти области определены Штумфом при помощи интерференционного аппарата, где возможно добиться исключения из состава звука любой области частот и выяснить таким образом, какую роль она играет в характеристике звука данной согласной. Данные Тренделенбурга и Крендалла в общем согласуются с этой таблицей. В записях звука согласной *p* характерны биения звука с частотой около 20 раз в секунду. Согласная *m* имеет высокий характеристический призвук в области около 4 000 кол./сек.; согласная *s* (рис. 21, *g*), имеет призвуки еще более высокие — до 6 000 кол./сек. а иногда даже до 8 000 кол./сек.

Результат изучения согласных и полугласных, приведенный в замечательной по полноте работе Крендалла, представлен в выборках в двух следующих таблицах:

¹ C. Stumpf. Beitr. zur Anat. d. Ohres, 17, S. 181, 1921.

ТАБЛИЦА РЕЗОНАНСНЫХ ЧАСТОТ ПОЛУГЛАСНЫХ
ПО КРЕНДАЛЛУ.

Согласная	Глоточный резонатор	Носовой резонатор		Ротовой резонатор
л . . .	228—406	683 (слабо)	—	1625—1932 ¹
н . . .	203—228	683	1217—1366	1488—2169
ng (англ.)	203—228	541—724	1217—1488	2298—2579
м . . .	271	—	1217—1488	861—1722 ² 2434—2579 (слабо)

Различия между согласными настолько тонки и незначительны, что уловление их лежит на пределе высоко чувствительных аппаратов, применявшихся Крендаллом. Остается только удивляться совершенству человеческого слухового аппарата, который без труда различает друг от друга все многочисленные согласные.

Средняя звуковая энергия речи за единицу времени очень не велика и составляет от 7 до 12 микроватт. Максимальные значения могут доходить до 2 000 микроватт. Индивидуальная сила голоса у отдельных лиц бывает весьма различна. Так, например, в среднем можно считать, что голоса в 10 раз более сильные и в 10 раз более слабые против нормы, встречаются у 10% людей.

До сего времени сравнительно мало подвергнут исследованию вопрос об анализе тембра голоса певцов; в этой области систематических исследований сделано почти

¹ Меняется, приближаясь к форманте последующей гласной.

² Меняется в зависимости от связанных гласных.

ТАБЛИЦА АНАЛИЗА СОГЛАСНЫХ ПО КРЕНДАЛЛУ.

Слог	Длительность согласной	Д л и т е л ь н ы е п р и з в у к и				Затухающие призвуки	
		В н а ч а л е		В середине и конце		Низкий	Высокий
		Звук свизок (основн. и гарм.)	Высокий призвук	Звук свизок	Высокий призвук		
ба	0,15	95, 190	—	91, 182	—	700	2900
па	0,03	—	—	—	3300	950	3600
да	0,11	94, 188	—	90, 180	3700	550	3000
та	0,06	—	—	—	4000	900	3100
га	0,11	100, 200, 300	—	90, 180	1500, 3400	575	3300
ка	0,07	—	—	—	1550, 4100	1250	3900
ва	0,22	100, 200	3100	100, 200	—	600	3000
фа	0,22	—	3200, 6400	—	3200, 6400	550	3600
жа	0,18	80, 240	3400	80, 160	2600, 5200	450	2700
ча	0,07	—	4800	—	2800, 4800	500, 1500	3000 (слабый)
ша	0,18	—	2800, 3600	—	2800, 4600	450	3200
за	0,23	100, 400	2800, 5600	90, 180	5200, 7000	400	3100
са	0,27	—	5600, 8000	—	6000, 7800	500	2900

не было. Однако вопрос этот во многих отношениях интересен, так как певческие голоса, безусловно, имеют тембр и области формант, существенно отличные от тех, которые присущи разговорному голосу. Объективный анализ певческого голоса чрезвычайно важен, конечно, и для целей вокальной педагогики, ибо до сих пор в этой области не знали другого критерия оценки голоса, кроме слуха, который, очевидно, не всегда является критерием безупречным.

Попытка исследования певческого голоса путем записи кривых сделана французским врачом Мараж¹. Однако техника записи в аппарате Маража настолько несовершенна, что совсем невозможно произвести анализ полученных им кривых. На основании его записей возможно судить лишь о динамике голоса, т. е. об изменении силы голоса, о начале звучания (аттака звука), о наличии или отсутствии вибраций и т. п., но никак не о тембре. Для вокальной практики исследования Маража представляют безусловный интерес.

В результате подробного исследования тембра певческого голоса, произведенного мною, совместно с В. С. Казанским² при помощи „звукового осциллографа“ Казанского³ удалось получить некоторые новые данные о характере певческого звука. Первая несомненная отмеченная особенность певческого звука — это чрезвычайно резкое усиление ре-

¹ Marage. *Physiologie de la voix a l'usage des chanteurs et orateurs*, Paris, 1911.

² В. Казанский и С. Ржевкин. Анализ звука певческого голоса и смычковых инструментов, Журн. Прикл. Физ., стр. 87, 1928; ZS. für Physik, 47, S. 233, 1928.

³ В. Казанский, Журн. Прикл. Физики, вып. IV, 1927.

зонирования обертонов в некоторой узкой области, тогда как в разговорном звуке усиление обертонов наблюдается в значительно более широкой области. На рис 27 *a, b*, даны спектры гласной *a* для певческого и разговорного голоса на высоте 129 кол./сек., на рис. 27 *c, d* даны аналогичные спектры

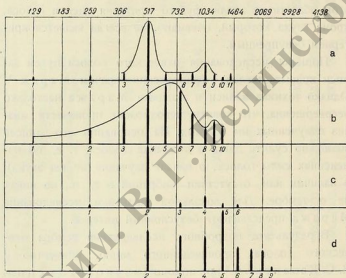


Рис. 27. *a* — спектр гласной *a* при певческом тембре (тон *c* — 129 кол./сек.); *b* — то же при разговорном тембре; *c* — спектр гласной *a* при певческом тембре (тон *c'* — 259 кол./сек.); *d* — то же при разговорном тембре.

гласной *a* на высоте 259 кол./сек. Резкость резонирования, может быть, возможно объяснить увеличением твердости стенок резонаторных полостей (глотка, зев, рот). Интересно отметить, что в правильно поставленном певческом звуке почти для всех гласных наблюдается обычно резкое усиление

одних и тех же, по абсолютной высоте, тонов: для c' — 259 кол./сек. это будет, например, второй обертон — 517 кол./сек. и четвертый — 1 034 кол./сек. Те же тоны (т. е. 4-й и 8-й обертоны) усилены в певческом голосе на высоте 129 кол./сек., так же на всех других гласных; то же самое замечено и на других тонах. Таким образом становится понятным, почему хорошо выработанные голоса имеют сходный, „певческий“, тембр у всех певцов.

Вторая характерная особенность певческого звука — это чрезвычайная изменчивость кривой, наличие целого ряда быстрых и неправильных пульсаций. Без этих пульсаций голос приобретает безжизненный характер. Рис. 21, *e* дает кривую звука голоса для высокой ноты (e' — 326 кол./сек.) баритона (артиста Воробьева). На записях певческого голоса очень часто встречаются кривые непериодического характера (рис. 21, *d*, *e*) или, верней сказать, постепенно видоизменяющиеся периодические кривые, что говорит уже о несомненном наличии негармонических обертонов. Наконец, в певческом звуке отмечается наличие для гласных *a* и *o* двух резонансных областей, а не одной, как это было принято считать до сих пор, что согласно с наблюдениями Крендалла.

Выше *re* второй октавы (580 кол./сек.) кривая звука женского голоса представляет почти совершенную синусоиду. На одной и той же высоте высокие ноты мужского голоса и низкие ноты женского мало различаются по форме кривой и спектрам. На ряде других интересных особенностей певческого голоса я здесь не буду останавливаться.

Анализ записанных кривых, т. е. разложение их на гармонические обертоны и нахождение „спектров“, представляет не особенно сложную, но чрезвычайно кропотливую работу, которая становится почти непреодолимой преградой в работе, лишь только появляется стремление к обследованию более или менее обширного материала. Для упрощения гармонического анализа существует целый ряд приемов и вспомогательных таблиц, напр., таблицы Ципперера (Zipperer) и Поллака (Pollack), изданные отдельными книгами, но все-таки анализ одной кривой занимает почти целый рабочий день. Наиболее удобно пользование механическими анализаторами. Из конструируемых в настоящее время следует упомянуть анализаторы Мадера ¹, Рау ² и Чебба ³, но они все представляют из себя довольно сложные приборы, дорогие по цене. Пользование анализатором Мадера сокращает время анализа кривой до одного часа. Нахождение высоких гармоник (выше десятой) на этом приборе не особенно точно.

Сложность процедуры анализа кривых вызвала разработку целого ряда методов исследования, при помощи которых звуковые спектры удается находить непосредственным исследованием звука без записи его. Исторически первый метод такого анализа предложен Гельмгольцем; известный анализатор с шаровыми резонаторами, осуществленный по его идее Кёнигом позволил произвести анализ без участия уха, наблюдая, за манометрическими пламенами, поставленными в устьях резонаторов.

¹ Mader. Elektr. ZS. 1909, S. 847.

² G. Rowe, El. World, March, 1905.¹

³ L. Chubb., El. Journ. (Pittsburg), Febr. and May, 1914.

На этом же принципе построен прибор Гартена¹ с резонатором переменной настройки (резиновый баллон, сжимаемый водой), амплитуда колебаний которого измеряется при постепенной перестройке его от самых низких до самых высоких тонов.

Я предложил² в 1923 г. конструкцию аппарата, который позволяет произвести снятие звуковых спектров совершенно автоматически. Идея прибора аналогична методу звукоанализатора Гельмгольца, основанному на обнаружении звука гармоник посредством резонанса, но с заменой акустических резонаторов, настроенных на разные частоты, одним электрическим резонансным контуром с плавной перестройкой в широком диапазоне. Этот аппарат, который можно назвать „акустическим волномером“, позволяет свести время полного снятия звукового спектра до нескольких секунд. Чувствительность этого метода в области высоких частот гораздо больше, чем метода записи кри-вых. Как показал опыт, аппарат может отчетливо разделить весьма близко лежащие высокие гармоники. Запись происходит на вращающемся барабане с фотографической бумагой.

Вегель и Мур³ сконструировали прибор для автоматического анализа звука также по методу электрического резонанса, но не с плавной перестройкой контура, а с перестройкой ступенями — через небольшие

¹ S. Garten und F. Kleinknecht, Leipziger Abhandlungen, Bd. 38, Nr. 9, 1921.

² С. Н. Ржевкин. Изв. Гос. Экспер. Электротехнич. Ин-та, 1926, № 14.

³ R. Wegel a. C. Moore, Bell. Syst. Techn. Journ., 3, p. 299, 1924.

перерывы. Амплитуды гармоник записываются осциллографом. Наконец Мур и Кертис¹ сконструировали весьма совершенный аппарат по принципу модуляции высокочастотных колебаний (частоты N) исследуемой звуковой частотой (n), причем получаются, как известно, колебания трех частот:

$$N - n, N, N + n.$$

Резонатор, применяемый в данном случае, имеет неизменную высоту тона 11 000 кол./сек. и очень острый резонанс (он представляет из себя толстый стальной стержень). Для того чтобы возбудить колебания резонатора звуковой частотой n , подстраивают высокую частоту N так, чтобы побочная, разностная частота ($N - n$) равнялась 11 000 кол./сек., этой частотой и возбуждается стержень через посредство электромагнитного вибратора. Ясно, что, перестраивая высокую частоту от 11 000 до 16 000 кол./сек., можно „провести“ мимо резонатора все звуковые частоты от 0 (при $N = 11\,000$) до 5 000 кол./сек. (при $N = 16\,000$) и зарегистрировать их, восприняв колебания стального резонатора помощью электромагнитного микрофона, усилив их помощью катодных ламп и записав на ленте осциллографа их амплитуду. Важно в данной конструкции то, что перестройка генератора от 11 000 до 16 000 кол./сек (на 50 %) может быть произведена простым переменным конденсатором емкостью в 2—3 000 см, тогда как весь звуковой диапазон обнимает около 7 октав и перестройка соответственной резонаторной системы очень

¹ C. Moore and A. Curtis, Bell Syst. Techn. Journ., 5, p. 216, 1927.

сложна. Прибор, основанный на модуляции, сконструирован Муром и Кертисом в лаборатории Вестерн-Электрик К⁰ и является самым удобным аппаратом данного типа из всех до сих пор предложенных. Аналогичный аппарат построен Грютцмахером¹, который показал, что этим методом вполне возможно пользоваться для анализа звука скрипки и голоса.

Общий недостаток всех аппаратов только что описанного типа — это невозможность анализа быстро меняющихся звуковых процессов, так как собственные колебания резонатора не могут мгновенно устанавливаться под влиянием возбуждающего звука — для этого требуется значительное время. Для анализа звука певческого голоса, звука музыкальных инструментов и вообще длительно не изменяющихся звуков, приборы данного типа являются чрезвычайно удобными, так как позволяют сразу получить звуковой спектр, минуя запись кривой и длительную процедуру анализа ее.

¹ M. Grützmacher. ZS. für. Tech. Phys, 8, S. 506, 1927.

Глава IX

ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЧИ В ТЕЛЕФОННОЙ ТЕХНИКЕ. ГРОМКАЯ ПЕРЕДАЧА РЕЧИ. ГРАММОФОН И ФОНОГРАФ. ГОВОРЯЩИЕ МАШИНЫ

Для целей практической телефонии крайне важно знать, насколько возможно ослабить речь при телефонной передаче, не уменьшая заметно ее разборчивости (артикуляции). Это исследование было произведено Флетчером¹. Оказалось, что разговорная речь лежит обычно на уровне громкости около $70 TU$ (см. гл. III). При этих условиях артикуляция речи, т. е. процент правильно понятых слогов (при беспорядочной передаче их) составляет около 95%. Ослабление речи до $40 TU$, т. е. в 1000 раз не вносит заметного уменьшения артикуляции. Дальнейшее ослабление влечет за собой резкое падение артикуляции. Так, ослабление до $20 TU$, т. е. на $50 TU$ ниже нормы (в 10^5 раз) дает артикуляцию только в 40%, ослабление до $10 TU$ (в 10^6) дает артикуляцию всего в 17%. Это исследование указывает — допустимый предел ослабления речи при телефонной передаче есть $30 TU$ ниже нормы

¹ H. Fletcher. Journ. Frank. Inst., 193, p. 6, 1922.

(в 1000 раз), что, очевидно, и должно служить основной цифрой при расчете дальности телефонной передачи. Если ослабление, вносимое телефонной линией, больше этого предела, то необходимо применение так называемых трансляций (усилителей с катодными лампами). Интересно отметить, что при постепенном ослаблении речи последними исчезают тона около 700 кол./сек.

Полное исследование звукового материала, произведенное в последние годы Крендаллом и Сация в Америке и Тренделенбургом, а также Штумпфом в Германии, позволило в настоящее время поставить совершенно отчетливо те требования к телефонным и радиовещательным установкам, которые обеспечивают полное совершенство передачи речи. Главное из этих требований заключается в неискаженной передаче всех тонов вплоть до 8—10 000 кол./сек. Передача оказывается относительно хорошей при захвате области до 4 000 кол./сек., но здесь уже будет заметна неясность некоторых согласных, как-то: *с, ф, ч, ш, щ* и др., которая почти не скажется на артикуляции, но несколько исказит характер звука, что для художественной передачи уже неприемлемо. В сторону низких тонов требования являются не столь жесткими. Так оказалось, что передача всех частот ниже 300—400 кол./сек. является не особенно важной. Чтобы понять это несколько неожиданное наблюдение, нам придется несколько подробней коснуться вопроса о распределении энергии речи по частотам. Исходным пунктом для изучения речи, как физического феномена, послужили исследования чувствительности слуха, которые позволили установить, в связи с анализом звука речи, распределение (среднее статистическое) энергии речи по частотам и

относительную громкость речи по отношению к порогу слышимости. Сводка результатов этих работ сделана на рис. 6, где область речи представляет собой заштрихованную часть всей области слухового восприятия.

Выяснение среднего распределения энергии речи по частотам чрезвычайно существенно для телефонной практики; еще существеннее решить вопрос о важности тех или других частот для ясности передаче речи. Для решения этой задачи перед конденсаторным микрофоном произносился ряд слогов, состоящих из гласных и согласных в той пропорции, как они встречаются в действительной речи; получающиеся электрические колебания звуковой частоты усиливались, регистрировались и после анализа представлялись в форме звуковых спектров. Суммарный результат исследования распределения энергии в „спектре“ речи, произведенный Крендаллом и Мэкензи¹, изображен на рис. 28, кривая А. Эта кривая относится к среднему человеческому голосу. Она имеет максимум в области 150 кол./сек. В спектре женской речи максимум лежит на 250 кол./сек., в спектре мужской — на 125 кол./сек. Так как главную составную часть речи представляют гласные, то распределение энергии речи можно построить также на основании анализов гласных, сделанных Миллером. Таким способом получается кривая В, с максимумом в области 700 кол./сек. Несоответствие этих кривых объясняется тем, что во всех анализах Миллера энергия низких частот недооценена.

Из приведенных данных казалось бы естественным сделать вывод, что для совершенства передачи речи по

¹ J. Crandall and Mackenzie, Phys. Rev., 19, p. 221, 1922.

телефону надо заботиться главным образом о том, чтобы без ослабления передавалась область низких частот от 100 до 300 кол./сек., и с этим расчетом строить передающие и воспринимающие приборы. Однако опыт показывал, что дело обстоит совершенно иначе.

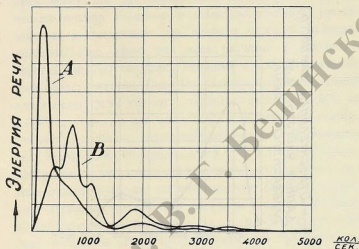


Рис. 28. Распределение энергии в спектре разговорной речи, A — по Крендаллу и Мэккензи, B — по данным Миллера.

В лаборатории Вестерн-Электрик К^о, Флетчером¹ была исследована разборчивость передачи речи при условии поглощения определенной области частот при помощи электрических фильтров. Опыт дал изумительный результат: оказалось, что при исключении всех низких частот до 500 кол./сек. разборчивость или артикуляция речи падает всего на 5% по отношению к нормальной; исключение

¹ H. Fletcher, Journ. Fran. Inst., 193, p. 729, 1922.

всех частот до 1000 кол./сек., причем поглощается 82% всей энергии речи, уменьшает разборчивость всего на 15%. Поглощение области частот выше 1000 кол./сек. сразу влечет резкое уменьшение разборчивости.

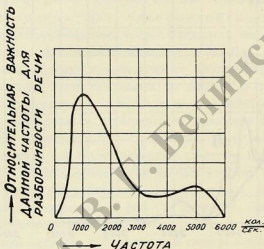


Рис. 29. Относительная важность различных частот для разборчивости речи.

Интересно отметить, что тембр речи, когда из нее исключены низкие частоты, становится режущим, с „металлическими“ оттенками. При исключении всех высоких частот тембр приобретает глухой, „темный“ характер. Исключение всех частот выше 1000 кол./сек., несущих только 18% энергии, уменьшает разборчивость до 40% нормальной.

Из этих опытов легко подсчитать относительную важность различных частот для разборчивости речи; из

кривой на рис. 29¹ мы видим, что наиболее важна область частот по соседству с 1 000 кол./сек. и что вообще высокие частоты важнее, чем низкие. Здесь приходится с удивлением вспомнить, что резонанс большинства железных телефонных мембран лежит как раз близко от 1 000 кол./сек. Эмпирический подбор толщины и диаметра, очевидно, привел как раз к наилучшим для ясности передачи размерам мембран. Уже давно для всех расчетов в телефонии берется тон 700 кол./сек., лежащий в пределах важнейшей области частот. Как уже указано, наиболее важной для ясности речи является передача частот от 500 до 3 000 кол./сек., но для полной ясности передачи тембра, гласных и особенно согласных необходимо неискажение всех частот до 8 000 кол./сек., что ставит перед телефонной техникой очень жесткие требования, которые на практике большею частью не выполняются. Однако устройство идеальной телефонной передачи вполне возможно; осуществленная в лаборатории Вестерн-Электрик К^о, (под названием „High Quality Telephone System“), система несколько более сложная и дорогая, чем обычная, позволяет передать речь и музыку со всеми тонкостями оттенков, так что передачу нельзя отличить от действительности.

Причину незначительности искажения тембра при исключении низких частот выяснил в своих исследованиях, уже упомянутых выше (гл. IV), Флетчер. Дело в том, что механизм уха обладает способностью комбинировать низкие тоны в результате созвучания нескольких высоких обертонов. Как результат этого свойства

¹ Взято из статьи R. Jones'a, The Nature of Language, A. I. E. E., Apr., 1924.

уха и является способность уха восстанавливать исключенные низкие тона субъективно, в результате сочетания верхних гармоник. Таким образом, искаженная передача низких частот не играет столь важной роли, как это могло бы казаться на первый взгляд, судя по кривой распределения энергии речи по частоте (рис. 28).

Указанные наблюдения касаются только разборчивости речи. Если подходить к передаче музыки или пения, то мы встаем перед совершенно иными особенностями тембра, связанными с красотой созвучания, с гораздо большим диапазоном громкости и с звуковыми сочетаниями огромной сложности, ввиду чего задача конструирования воспринимающих и воспроизводящих аппаратов становится перед новыми трудностями.

Особенно сложна становится задача конструирования устройств для передачи речи и музыки с увеличенной громкостью — задача построения так называемых громкоговорителей. Я не буду останавливаться на бесчисленных системах аппаратов этого рода, появившихся в последние годы, скажу лишь о тех требованиях к ним, которые ясно вырисовываются в результате разобранных выше исследований речи и слуха.

Помимо основного требования большой звуковой отдачи с хорошим коэффициентом полезного действия, здесь необходимо выполнение еще ряда добавочных требований. Громкоговоритель должен передавать частоты от 50 до 8000 кол./сек. без относительных искажений в амплитудах различных частот. В этом отношении сильно вредят собственные тоны мембраны и рупора (обычно применяемого), которые дают селективные усиления и

ослабления ряда частот и искажают тембр звука. Частоты выше 4 000 кол./сек. обычно с трудом удается как воспринять, так и передать громкоговорителем, в результате чего получаются неясность произношения шипящих и свистящих согласных и ухудшение артикуляции.

Второе важное обстоятельство — это, чтобы мембрана громкоговорителя не обладала резко выраженными собственными тонами, дающими послезвучание и набегание предыдущих звуков на последующие, что особенно вредно влияет при быстро меняющихся по высоте и силе звуках речи; это приводит практически к требованию низкого периода и большого декремента затухания мембраны. Выполнение этого требования возможно, но приводит к ослаблению звукоотдачи. Мембрана должна быть способна передать амплитуды, значительно превышающие среднюю силу звука, так как в ряде согласных и гласных возможны резкие максимумы мощности, превышающие средний итог в сотни раз. Наконец, из исследований слуха ясно, что усиление звука выше известных границ (80—90 *TU*) ведет к возникновению сильных комбинационных тонов и, следовательно, к искажениям. Поэтому совершенно ясно еще одно требование — необходима такая передача звука, чтобы слушатели воспринимали ее в естественных условиях громкости.

Всем этим требованиям удовлетворяет, повидимому, пока только безрупорный громкоговоритель (Blatthaller), сконструированный фирмой Сименса, по идее Риггера и при сотрудничестве

ряда видных физиков и инженеров¹. В этом аппарате излучающая мембрана имеет площадь в несколько квадратных дециметров и приводится в мощные колебания всей своей площадью целиком, как поршень. Получающиеся звуки настолько мощны, что могут покрывать огромные площади и вблизи совершенно непереносимы.

Сравнение записей кривых первичного и усиленного звука показали, что передача является в высокой степени совершенной. Несомненный успех, который мы наблюдаем в данном случае, безусловно обязан широко поставленному систематическому изучению вопроса в ряде научных лабораторий, что дало все необходимые элементы для конструирования и позволило выработать методику оценки достигнутых результатов.

Попутно я коснусь вопроса об улучшении техники граммофонной записи и воспроизведения. При записи звука для граммофона главная трудность возникает из-за малости энергии звука, что влечет за собой необходимость применения рупоров, а это приводит к ряду искажений. Кроме того вся механическая система для записи специальным резцом вносит известную неравномерность в передачу различных частот. Применение усилителей с катодными лампами разрешает вопрос о совершенном восприятии и усилении звука для целей граммофонных записей и позволило пойти в этом направлении гораздо дальше, чем это удавалось до сих пор.

Интересно, что методы расчета электрических колебательных контуров и фильтров удалось целиком перенести на расчет механических систем при граммофонной

¹ F. Trendelenburg, Siemens ZS. 2, S. 141, 1927; а также W. Schumann. ETZ, 47, S. 294, 1926.

и фонографической записи. Максфильд и Харрисон¹ произвели полный расчет как записывающей, так и воспроизводящей звук системы (иголка, рычаг, мембрана, воздушная камера, рупор) и внесли целый ряд практических изменений в конструкцию фонографа, в результате чего удалось осуществить равномерную запись и передачу всех частот от 100 до 4 500 кол./сек., тогда как лучшие прежние аппараты давали запись, ограниченную нижним пределом 250 кол./сек. и с резким максимумом (в тысячи раз) около 2 000 кол./сек. Чрезвычайно важной оказалась конструкция рупора²; авторы выбрали рупор, образующие которого изогнуты по логарифмической кривой; такой рупор замечателен тем, что он почти не имеет резонансных свойств и передает все частоты равномерно. Схема такого рупора воспроизведена на рис. 30.

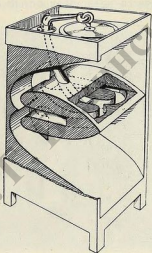


Рис. 30. Совершенная форма рупора для граммофона, разработанная Вестерн Электрик К^о.

Мне остается еще коснуться ряда интереснейших попыток построения звуков речи искусственным путем, то есть вопроса о синтезе гласных и согласных. Первая научная попытка этого рода была сделана Гельмгольцем, который построил

¹ J. Maxfield and H. Harrison, Bell Syst. Techn. Journ., V, p. 493, 1926.

² A. Webster, Proc. Nat. Acad. Sc., 1919.

аппарат для синтеза гласных из гармонических тонов произвольного основного тона, смешиваемых в определенных пропорциях. Аппарат этот (фотографии и описания которого имеются в большинстве курсов физики) дает звуки, напоминающие гласные *a*, *o*, *y*, *e*, но воспроизведение их далеко от совершенства, что объясняется недостаточностью количества обертонов (всего 8,

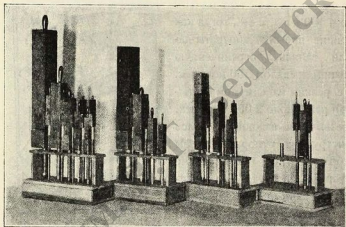


Рис. 31. Наборы труб, воспроизводящие гласную „а“, издаваемую голосами: 1) мужчины, 2) женщины, 3) мальчика и 4) ребенка.

причем верхний тон давал всего 1792 кол./сек.) и слабостью верхних обертонов. Несовершенство воспроизведения гласных аппаратом Гельмгольца было признано многими авторами следствием несостоятельности теории построения гласных из гармонических тонов. Однако Миллеру¹ удалось показать, что, составляя комби-

¹ D. C. Miller, Science of Musical Sounds., Chapter VIII.

нации большого числа (до 16) органнх труб, настроенных на гармонические тоны некоторого основного низкого тона, удается воспроизвести гласные с большой степенью совершенства. На рис. 31 показаны 4 различных серии труб, воспроизводящих гласную *a*, произносимую голосом мужчины, женщины, мальчика и ребенка; в последнем случае требуется всего три трубы.

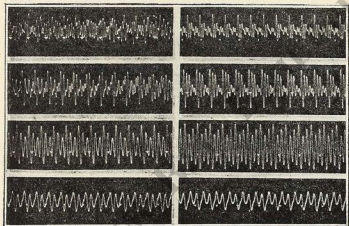


Рис. 32. Запись звука гласных *a*, *a'*, *o* и *y*, издаваемых голосом (справа) и воспроизводимых наборами труб (слева).

Рис. 32 показывает запись звуковых кривых, произнесенных естественным голосом гласных *a*, *ao*, *y* (справа), и таковых же синтетических (слева). По характеру кривые очень близки, разница между ними может объясняться иным соотношением фаз в синтетическом звуке, что отражается на форме кривой, но не отражается на тембре звука. Если резиновый шланг, подводящий воздух к трубам, зажимать и отпускать, то производится согласная *n*

и удастся „произносить“ слова *па-па, пау-пау* и т. п. Если производится неполное зажатие, то получается звук *м* и слово *ма-ма*. Эти опыты позволяют надеяться, что путем комбинации нескольких гласных и приспособлений для перерывов звука и воспроизведения ряда шумов, подобных звуку „взрывных“ (explosive) согласных, удастся построить машину, которая будет говорить все слова. Осуществление этой идеи, конечно, очень трудно и несколько фантастично.

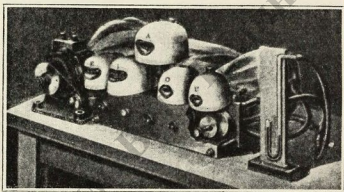


Рис. 33. „Маски“ Маража для воспроизведения звука гласных.

Гораздо проще и совершеннее удалось ряду авторов воспроизвести гласные, подражая естественному возбуждению звука в гортани и видоизменяя его резонаторами.

Так, Мараж¹ построил ряд резонаторов-масок (рис. 33), имитирующих объем и форму рта для разных гласных и возбуждая их звучание — при помощи искусственной гортани, возбуждаемой сжатым воздухом.

¹ Marage, *Physiologie de la voix*, Paris 1911.

Стюарт¹ в 1922 г. устроил аппарат для воспроизведения гласных, пользуясь двумя электрическими контурами, возбуждаемыми прерывателем (рис. 34). Звук воспроизводится телефоном, слабо связанным с обоими контурами, причем можно было произвольно усилить ту или другую составляющую звука. „Электрический голос“ Стюарта позволил воспроизвести

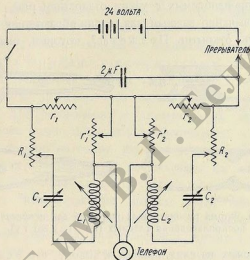


Рис. 34. Электрическая аналогия гортани и резонаторных полостей по Стюарту.

все гласные и дифтонги, полугласные (л, м, н) и шипящие согласные; воспроизвести удастся тембр голоса певческого разговорного или шопота. Удалось также воспроизвести ряд слогов и простых слов, как-то: *анна, уо-уо, жи-жи, мама* и др. В аппарате Стюарта крайне существенна возможность

¹ J. Stewart, Nature, Sept. 2, 1922.

менять не только настройку резонаторов, но и затухание их, регулируя реостаты, что трудно осуществимо в механических системах. Настройка резонансных контуров для гласных соответствовала положению формант, как она найдена большинством авторов. Затухание оказалось наибольшим для случая гласных *a* и *ae* (произносимых с широким отверстием рта) и наименьшим для гласных *y* и *и* (произносимых с узким отверстием рта).

Чрезвычайно важным для теории образования гласных оказалось открытие Педжета ¹, который, анализируя

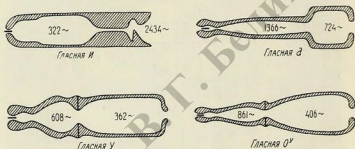


Рис. 35. Форма резонаторных полостей для искусственного воспроизведения гласных (по Педжету).

звук гласных на-слух, пришел к выводу, что все гласные обладают двойной формантой. Раньше принималось существование двойной форманты лишь у гласных *e* и *и*. Педжет подтвердил свое заключение на опыте искусственного воспроизведения гласных при помощи двойных резонаторов сложной формы (рис. 35), подбираемых эмпирически, путем подражания форме полости рта и глотки. Возбуждение „голоса“ производится искусственной гортанью, которая пред-

¹ R. Paget, Proc. Roy. Soc. (A), 102, p. 752, 1923.

ставляет из себя резиновую полосу, натянутую в узкой щели (пищик). Резонаторы могут стоять последовательно друг с другом или параллельно. Пищик может лежать сзади обоих резонаторов или в промежутке между ними. Это последнее наблюдение говорит за то, что подсвязочный резонатор может играть весьма существенную роль в голосообразовании.

Как уже указывалось выше (гл. VIII), полный анализ записей звуков речи, произведенный Крендаллом¹, также показал с несомненностью наличие двух формант у всех гласных. В главе VIII мы уже коснулись теории Крендалла, который облек идею Педжета в математическую форму и доказал, что резонансом в системе двух связанных резонаторов можно объяснить возникновение всех гласных. Из теории вытекают размеры резонаторных полостей и величины отверстий, сообщающих их между собой и с наружным воздухом. Крендалл попытался проверить количественные выводы своей теории, на опыте с искусственным резонатором, возбуждаемым искусственной гортанью или телефоном, который питался прерывистым током (форма кривой тока подобна зубьям пилы), причем воспроизведение гласных по теоретическим данным удалось удовлетворительно, однако, не так хорошо, как это может быть достигнуто при искусственном подборе резонаторов; впрочем полного успеха и трудно было ожидать, так как теория имеет лишь характер первого приближения к действительности.

¹ J. Crandall, Bell. Syst. Techn. Journ., IV, p. 586, 1925.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	5
Глава I. Стрoение слухового аппарата человека.— Пре- делы слышимости звука	11
Глава II. Определение чувствительности уха.— Профес- сиональные и медицинские испытания слу- ха.— Тонкость слуха	23
Глава III. Громкость звука.— Закон Вебера-Фехнера.— Эмпирические формулы громкости сложных звуков.— Ионная теория слуха	36
Глава IV. Восприятие созвучий.— Комбинационные то- ны.— Диссонанс и консонанс.	53
Глава V. Резонансная теория слуха.— Ее современное состояние, критика и затруднения	70
Глава VI. Бинауральный эффект.— Теории, объясняющие восприятие направления слухом.— Практиче- ские приложения	80
Глава VII. Стрoение голосового аппарата человека.— Его функционирование	92
Глава VIII. Анализ звуков речи и запись их.— Теории образования гласных.— Анализ певческого го- лоса.— Аппараты для автоматического анализа звука	101
Глава IX. Практические приложения исследований речи в телефонной технике.— Громкая передача речи.— Граммофон и фонограф.— Говорящие машины	130

ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ШКОЛА № 39082

В. Г. ВЕЩЕВСКОГО
Свердловск

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ

Я. Я. ХИНЧИН

ВЕЛИКАЯ ТЕОРЕМА ФЕРМА

Стр. 76.

2-е изд.

Ц. 75 к.

К. ФУНК

ВИТАМИНЫ

Перевод под ред. М. Я. Серейского. С предисловием
автора к русскому изданию.

Стр. 90.

2-е изд.

Ц. в/п. 75 к.

С. И. ВАВИЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ

ОСНОВАНИЯ

ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Стр. 168.

Ц. в/п. 65 к.

ДЖ. ДЖИНС — А. ЭДДИНГТОН

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ

КОСМИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

Перев. с англ. С. И. Вавилова

Стр. 68.

Ц. в/п. 60 к.

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ МАГАЗИНАХ
И ОТДЕЛЕНИЯХ ГОСИЗДАТА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА—ЛЕНИНГРАД

НОВЕЙШИЕ ТЕЧЕНИЯ НАУЧНОЙ МЫСЛИ
В. ПАУЛИ

БЕЛКИ И КОЛЛОИДЫ

Перев. с нем. В. А. Энгельгардта

Стр. 66.

Ц. в/п. 75 к.

А. ЭДДИНГТОН

ЗВЕЗДЫ И АТОМЫ

Перев. с англ. С. И. Вавилова

Стр. 152.

Ц. в/п. 1 р. 15 к.

О. МЕЙЕРГОФ

ТЕРМОДИНАМИКА ЖИЗНЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Перев. с нем. В. А. Энгельгардта

Стр. 87.

Ц. в/п. 75 к.

П. П. ЛАЗАРЕВ

УСПЕХИ ГЕОФИЗИКИ

А. ГИЛЛ

РАБОТА МЫШЦ

ПРОДАЖА ВО ВСЕХ МАГАЗИНАХ
И ОТДЕЛЕНИЯХ ГОСИЗДАТА

СОУНЬ им. В. Г. Белинского

СОУНЬ им. В. Г. Белинского

СОУНЪ им. В. Г. Белинского

1 р. 20 к.
Папка 15 к.

6



СОУНБ им. В. И. Белинского